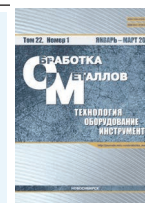




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Влияние структуры материала на морфологию деформированной поверхности

Екатерина Алфёрова^{1, а,*}, Андрей Филиппов^{2, б}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

² Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, пр. Академический, 2/4, Томск, 634055, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0001-9579-6870>,  katerina525@mail.ru, ^б  <https://orcid.org/0000-0003-0487-8382>,  andrey.v.filippov@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 538.9

История статьи:

Поступила: 24 октября 2019
Рецензирование: 27 декабря 2019
Принята к печати: 20 января 2020
Доступно онлайн: 15 марта 2020

Ключевые слова:

Морфология поверхности
Деформация
Трёхмерные параметры
шероховатости
Монокристаллы
Поликристаллы
Ультрамелкозернистые металлы
Микроструктура

Финансирование

Результаты получены при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований государственных академий на 2013–2020 годы (проект № III.23.2.4). Работа выполнена при поддержке Томского политехнического университета в рамках Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

Благодарности

Авторы благодарят проф. д.ф.-м.н. Д.В. Лычагина за образцы монокристаллов.

АННОТАЦИЯ

Введение. Морфологические изменения свободной поверхности материалов в процессе нагружения интересны с фундаментальной и практической точки зрения. В первом случае благодаря деформационному рельефу ученые судят о процессах, протекающих внутри материала, идентифицируют механизмы деформации, анализируют изменение напряженно-деформированного состояния и т.д. Во втором случае деформационный рельеф представляет собой нежелательное явление, так как он ухудшает сопротивление усталости, адгезию, приводит к растрескиванию и снижает другие физико-механические свойства деталей машин. Кроме того, на основе деформационного рельефа пытаются оценивать остаточный ресурс работы деталей машин. Сегодня промышленность использует материалы в различном структурном состоянии. Микроструктура металла (наличие или отсутствие зерен и границ зерен, размер зерна, текстура, кристаллографическая ориентация и т.д.) оказывает существенное влияние на характер протекания пластической деформации и морфологию деформированной поверхности. **Цель работы:** изучить влияние структуры материала на эволюцию морфологии поверхности в процессе деформации. **В работе исследованы** никелевые образцы в монокристаллическом, поликристаллическом и ультрамелкозернистом состоянии. **Методами исследования** являются механические испытания на сжатие, конфокальная лазерная сканирующая микроскопия. Количественная оценка проводилась с использованием стандартизированных трехмерных параметров шероховатости. **Результаты и обсуждение.** В работе показано, влияние внутренней структуры материала на эволюцию морфологии деформационной поверхности. Изменения в деформационном рельефе обсуждены с точки зрения преобладающих деформационных механизмов для каждого структурного состояния материала. Показано, что с использованием трехмерных параметров шероховатости можно оценить наличие потенциальных концентраторов напряжений на поверхности. Было определено, что наличие глубоких острых впадин наиболее присуще материалу в поликристаллическом состоянии. Результаты работы могут быть полезны для аргументированного выбора микроструктуры материала при изготовлении деталей машин и для математического моделирования поведения металлов под нагрузкой.

Для цитирования: Алфёрова Е.А., Филиппов А.В. Влияние структуры материала на морфологию деформированной поверхности // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 90–101. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-90-101.

Введение

Конструкционные материалы являются фундаментом промышленности, поэтому важным вопросом является характер их поведения в процессе нагружения. Морфологические характери-

*Адрес для переписки

Алфёрова Екатерина Александровна, к.ф.-м.н., доцент
Томский политехнический университет,
пр. Ленина, 30,
634050, г. Томск, Россия
Тел. +7-909-547-12-01, e-mail: Katerina525@mail.ru

стики поверхности под нагрузкой могут меняться, что часто имеет негативные последствия для деталей машин, так как шероховатость поверхности влияет на отражательные, адгезионные и другие эксплуатационные свойства, а также может способствовать зарождению трещин. Существуют работы, которые показывают, что благодаря оценке морфологии поверхности можно судить о внутреннем состоянии материала [1–10] и прогнозировать ресурс работы деталей машин [11].

Кроме того, сегодня в промышленности используются материалы в различном структурном состоянии. Микроструктурные параметры такие, как размер зерна, кристаллографическая ориентация, текстура, сложное напряженно-деформированное состояние, вызванное внутренней структурой, влияют на морфологию и шероховатость поверхности в процессе нагружения [2, 12–13]. Особенно перспективными на сегодняшний день выглядят материалы с ультрамелкозернистой структурой (УМЗ). Деформационное поведение УМЗ сплавов обычно характеризуется повышением их прочностных свойств и снижением пластичности. Ряд работ сообщают о положительном влиянии интенсивной пластической деформации на свойства материалов [14–17], но вместе с тем есть сведения и о ее отрицательном влиянии [18, 19].

Таким образом, интересно было бы проследить влияние исходной внутренней структуры металла на эволюцию морфологии поверхности в процессе нагружения и провести количественную и качественную оценку деформационного рельефа.

Целью работы является исследование и количественная оценка влияния структуры материала на морфологию деформированной поверхности, в том числе рассмотрение возможности применения трехмерных параметров шероховатости для выявления различий в деформационных механизмах материалов с разной структурой (моно-, поликристаллы и материалы в УМЗ состоянии), а также потенциальных концентраторов напряжений на поверхности.

Методика экспериментального исследования

Для того чтобы проследить влияние внутренней структуры на морфологию деформированной поверхности, в качестве объекта ис-

следования был выбран никель в различном структурном состоянии: монокристаллы никеля (чистота 99,99 %) с ориентацией осей сжатия в углах стереографического треугольника; поликристаллический никель марки НП1 (отжиг при 800 °С в течение одного часа) с размером зерна 170 ± 23 мкм. Образцы в УМЗ-состоянии получены равноканальным угловым прессованием (РКУП) с поворотом заготовки на угол в 90° относительно продольной оси перед каждым последующим циклом прессования (схема Вс, восемь проходов).

Деформацию сжатием проводили на испытательной машине Instron ElektroPuls E10000 при скорости $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Картину деформационного рельефа снимали на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе Olympus LEXT OLS4100. Размер сканированного участка в каждом отдельном случае составлял $0,066 \text{ мм}^2$ ($0,256 \times 0,256$ мм). Разрешение по глубине – 0,06 мкм. Исследования проведены в интервале деформации 1,5...32 %.

Для описания морфологии деформированной поверхности использовали трехмерные параметры шероховатости (расчет по всей сканируемой поверхности), нормированные согласно стандарту [20]. В настоящей статье были использовали количественные параметры:

Sq – среднее квадратичное значение высоты поверхности ограниченного масштаба (root mean square height of the scale-limited surface).

Ssk – асимметрия поверхности ограниченного масштаба (skewness of the scalelimited surface).

Дополнительно для количественной оценки развития деформационного рельефа был использован безразмерный параметр Fr (интенсивность деформационного рельефа/фактор шероховатости), который представляет собой отношение площади реальной поверхности к площади проекции:

$$Fr = (Sd/Sp) - 1,$$

где Sd – площадь поверхности после деформации (истинная площадь поверхности); Sp – площадь горизонтальной проекции поверхности (геометрическая площадь поверхности) [21, 22].

Физический смысл параметра Fr заключается в том, что он оценивает степень развитости деформационного рельефа на поверхности. Параметр Fr не стандартизирован.

Результаты и их обсуждение

Деформационный рельеф, формирующийся при нагружении образцов никеля в разном структурном состоянии, показан на рис. 1.

Для монокристаллов характерно образование следов сдвига по октаэдрическим плоскостям и дальнейшая их организация в пачки плоскостей скольжения для ориентации [001] (рис. 1, а, б), в мезополосы – для [110] и в макрополосы и складки – для [111]. Для монокристаллов никеля авторы подробно описали зависимость деформационного рельефа от кристаллографической ориентации в работе [23].

Для поликристаллического агрегата (рис. 1, в, з) наблюдается первоначальное образование следов скольжения внутри зерен по наиболее нагруженным октаэдрическим плоскостям, далее начинают формироваться следы сдвига в менее нагруженных системах скольжения, появляются более сложные элементы рельефа складки, изогнутые полосы, отмечается сдвиг зерен по границам (рис. 2, стрелкой указан перепад высот

между соседними зернами). Мы не наблюдали пересечения следами сдвига границ зерен при используемом увеличении.

Для образцов в УМЗ-состоянии характерно наличие коротких изогнутых следов, расположенных в различных направлениях с самого начала нагружения, при увеличении степени деформации они огрубляются.

Далее проведем количественный анализ деформационного рельефа.

Фактор шероховатости Fr позволяет оценить степень развитости деформационного рельефа на поверхности с увеличением степени деформации (рис. 3).

Для поликристалла значение Fr растет наиболее интенсивно в сравнении с монокристаллами и материалом в УМЗ-состоянии. Зависимость может быть описана экспоненциальным законом, когда $y = 0,002e^{0,16x}$, $R^2 = 0,97$. Далее следуют материалы в УМЗ-состоянии при $y = 0,001e^{0,17x}$, $R^2 = 0,88$. Для монокристаллов мы можем отметить рост фактора шероховатости, но его характер не столь интенсивный.

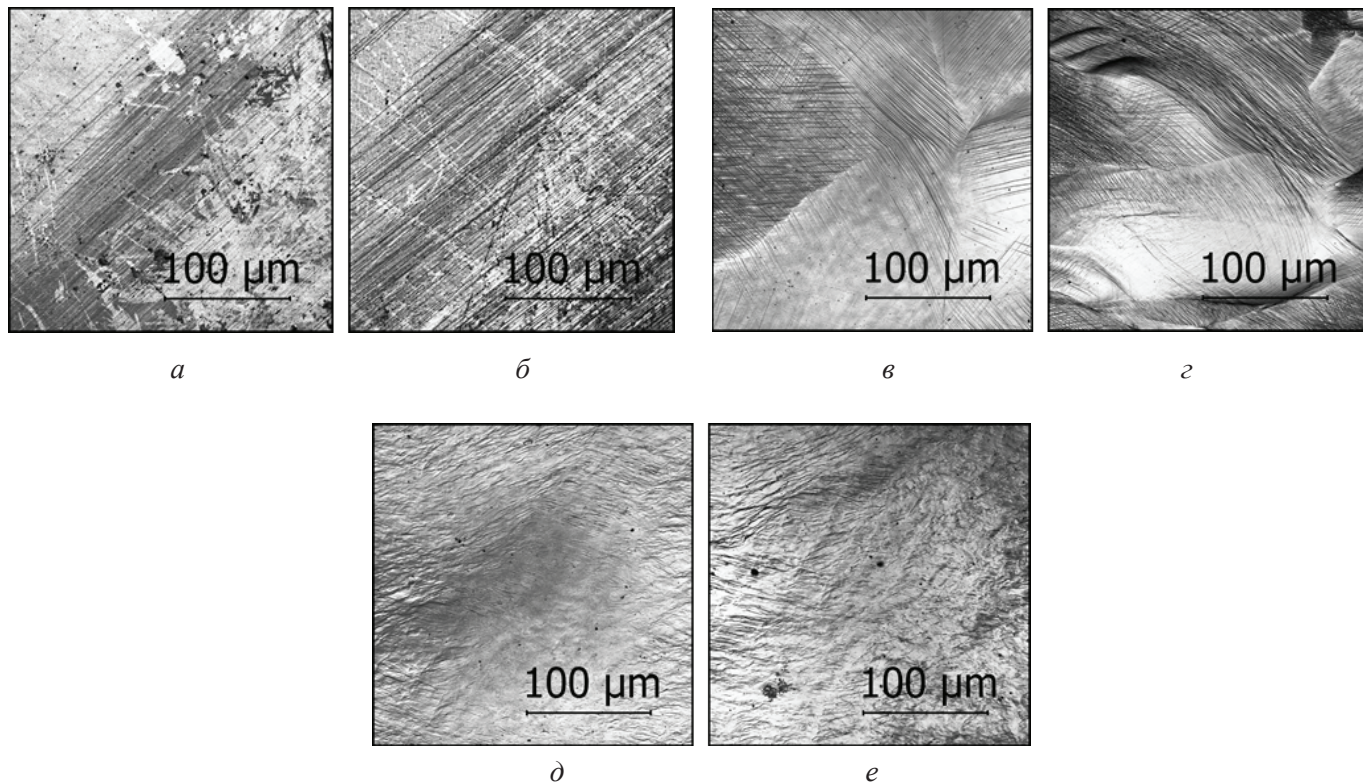


Рис. 1. Деформационный рельеф после $e = 7\%$ (а, в, д), $e = 27\%$ (б, з, е); [001] – монокристалл (а, б); поликристалл (в, з); УМЗ-состояние (д, е)

Fig. 1. The deformation relief after $e = 7\%$ (a, в, д), $e = 27\%$ (б, з, е); [001] single crystal (a, б); polycrystal (в, з); ECAP state (д, е)

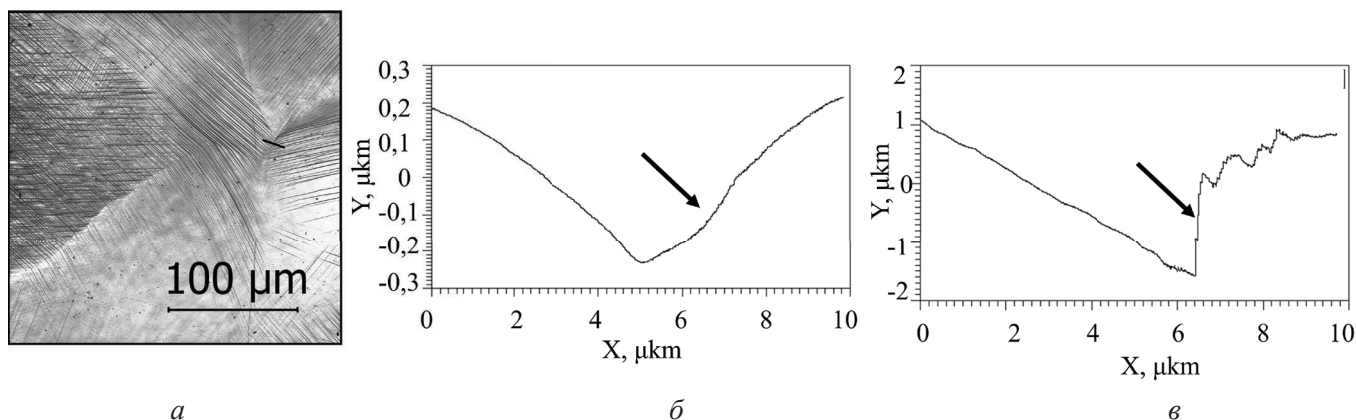


Рис. 2. Деформационный рельеф после $e = 26\%$ (а), профиль поверхности вдоль секущей $e = 8\%$ (б), $e = 26\%$ (в)

Fig. 2. The deformation relief after $e = 26\%$ (a), the surface profile along the secant line $e = 8\%$ (б), $e = 26\%$ (в)

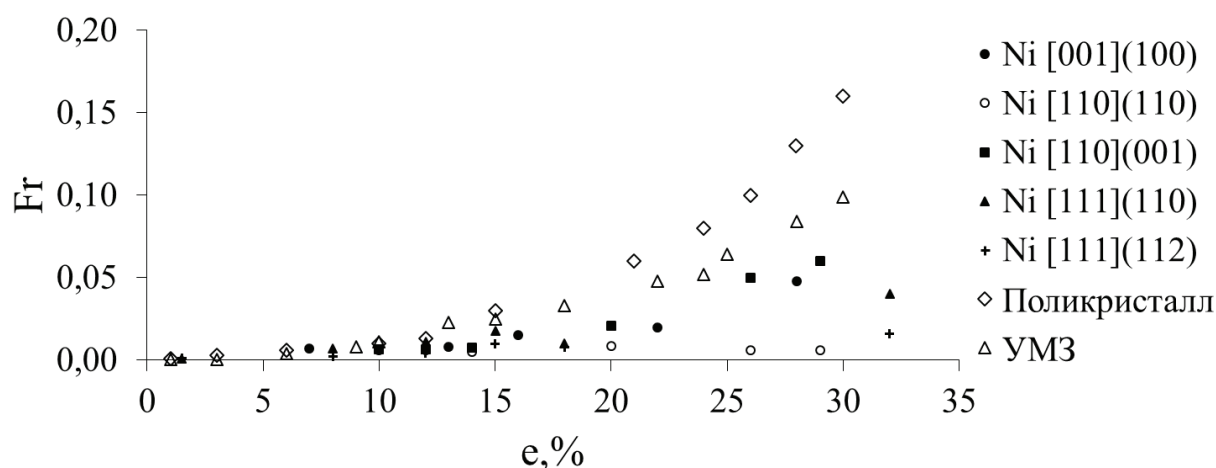


Рис. 3. Фактор шероховатости

Fig. 3. Roughness factor

Экспоненциальная зависимость фактора шероховатости от степени деформации описана в работе [22] на поликристаллах алюминия и титана.

Коэффициент асимметрии Ssk оценивает асимметрию распределения высоты рассматриваемой поверхности. Если правый хвост распределения длиннее левого, то показатель Ssk положительный. В этом случае на поверхности преобладают высокие пики, которые выделяются из среднего. В противном случае Ssk отрицательный, и поверхность имеет четкие глубокие впадины (концентраторы напряжений) и гладкие протяженные плато. Таким образом, коэффициент асимметрии показывает, что преобладает в профиле – выступы или впадины. С технической точки зрения важно,

что отрицательная асимметрия характерна для поверхности с хорошими опорными свойствами, в то же время отрицательная асимметрия характерна и для поверхностей с глубокими впадинами, что может приводить к зарождению трещин.

В рассматриваемых случаях отрицательное значение коэффициента асимметрии было установлено для поликристаллического агрегата после достижения деформации 20 % (рис. 4).

Рассмотрение профилей поперечного сечения деформированных поверхностей (рис. 5) позволяет заметить качественное различие в профилях. Наибольшее количество и более острые впадины характерны для поликристаллов, особенно при увеличении степени деформации.

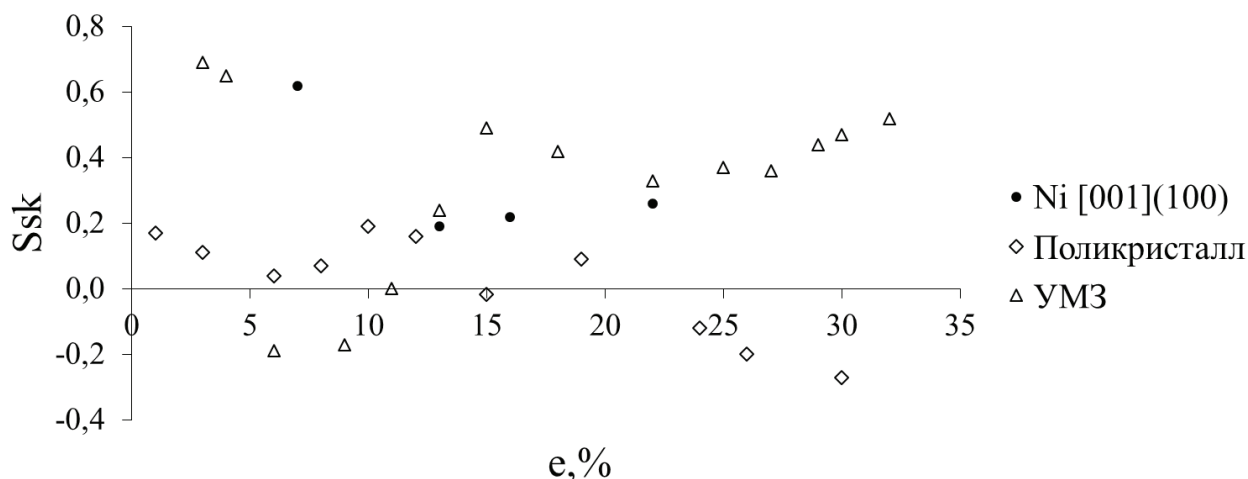


Рис. 4. Коэффициент асимметрии

Fig. 4. Asymmetry coefficient

При увеличении степени деформации величина среднего квадратичного значения высоты поверхности ограниченного масштаба Sq для монокристаллов всех рассмотренных кристаллографических ориентаций постепенно возрастает (рис. 6). При этом нет большого различия между кристаллическими ориентациями. Несколько более интенсивный рост можно отметить для ориентаций [111] (110) и [001] (100) при степенях деформации более 20 %. Данный факт связан с тем, что для этих случаев характерно формирование на гранях макрополос деформации и пачек следов сдвига соответственно [23]. Эти элементы деформационного рельефа локализуются на поверхности кристалла, и разница высот рельефа внутри них и в близлежащей области дает повышения значений Sq .

Величина Sq для поликристаллического никеля при увеличении степени деформации растет отличающимся от монокристаллов образом (рис. 6). Рост может быть описан экспоненциальной кривой $y = 0,4e^{0,12x}$ при $R^2 = 0,93$. Величина Sq для поликристаллического агрегата на начальных этапах близка к значениям для монокристаллов, но после $e = 15$ % она начинает значительно превышать их. Это хорошо согласуется с данными о том, что пластическая деформация в поликристалле протекает за счет кристаллографического скольжения внутри зерен и межзеренного скольжения. На начальных этапах превалирует первый механизм, а далее задействуется межзеренное скольжение и поворот.

На рис. 2 показан профиль сечения поверхности по границе зерен. Видно, что при $e = 8$ % перепад высот довольно близок к величине Sq , однако при достижении $e = 26$ % перепад увеличивается. Вместе с тем с точки зрения разрушения материала более интересен (и неблагоприятен) тот факт, что граница между зернами становится более резкая, т. е. развивается несовместность протекания пластической деформации, и границы зерен могут быть местами зарождения трещин. В данном случае необходимо отметить, что такой или иной сценарий (отсутствие резкой границы и перепада высот между соседними зернами) развития пластической деформации обусловлен кристаллографической ориентацией соседних зерен. В работе [12] экспериментально показано, что определяющим фактором для локализации деформации является кристаллическая разориентация соседних зерен.

Данные результаты могут быть полезны при выборе текстуры материала при изготовлении деталей машин.

Величина Sq для материала в УМЗ-состоянии близка к значениям для монокристаллов (рис. 6). Однако деформационный рельеф значительно от них отличается (см. рис. 1), а также можно видеть качественное отличие в соответствующих профилях поперечного сечения (см. рис. 5). Этот факт можно связать с механизмами деформации. Механизмы деформации для моно- и поликристаллов обсуждались выше, здесь же необходимо добавить

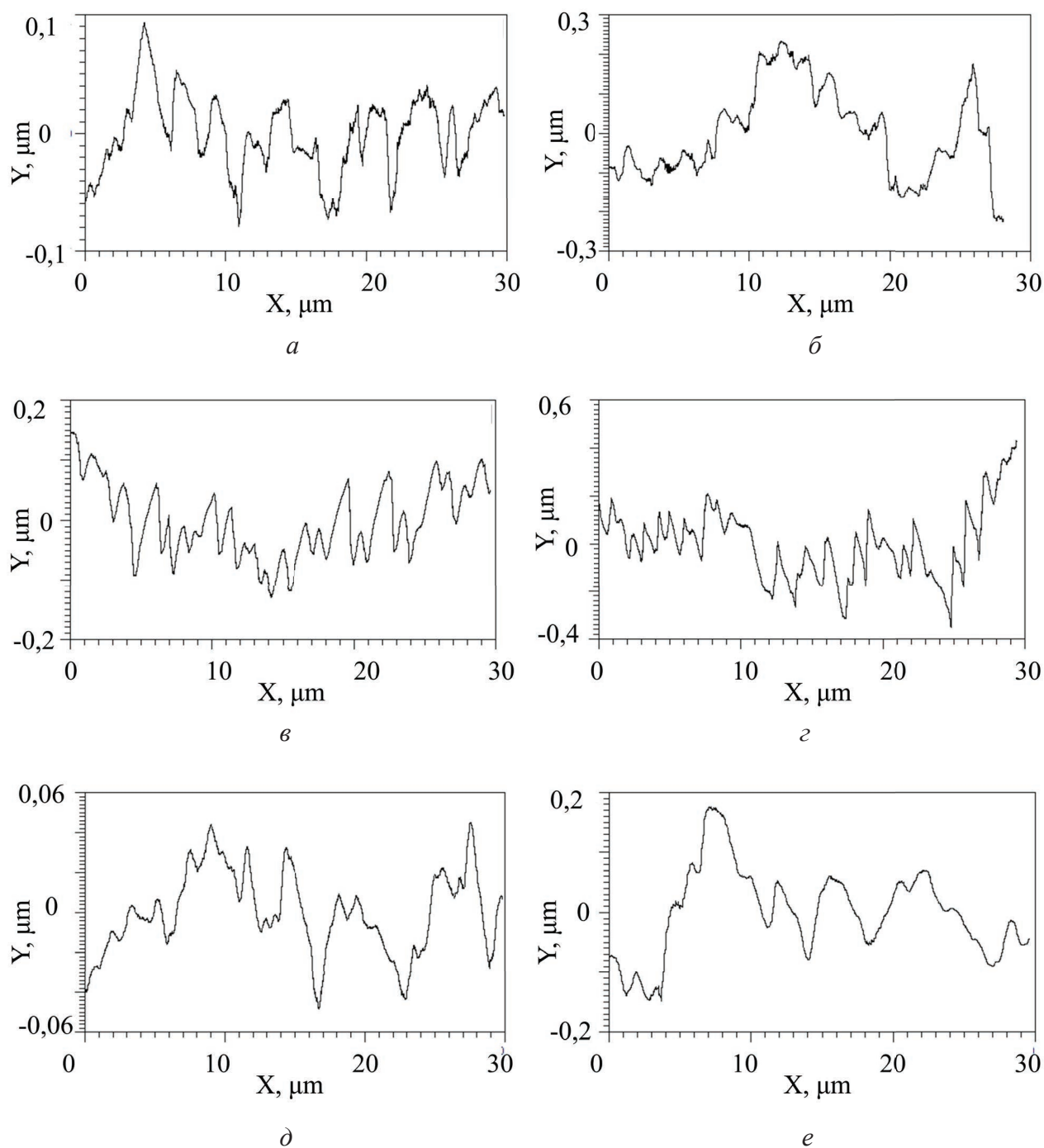


Рис. 5. Профиль поверхности после $\epsilon = 7\%$ (а, в, д); $\epsilon = 27\%$ (б, з, е); [001] – монокристалл (а, б); поликристалл (в, з); УМЗ-состояние (д, е)

Fig. 5. The surface profile after $\epsilon = 7\%$ (а, в, д); $\epsilon = 27\%$ (б, з, е); [001] – single crystal (а, б); polycrystal (в, з); ECAP state (д, е)

сведения, касающиеся УМЗ-состояния. Для УМЗ-материалов, полученных РКУП, преобладающим механизмом деформации является зернограничное скольжение (ЗГС), а также и скольжение внутризеренных дислокаций. Валиев Р.З. с соавторами [24] говорит о том, что оценка вклада ЗГС в общую деформацию

достигает 25 %. В работах [25, 26] вклад ЗГС для УМЗ-алюминия был оценен на уровне 40...70 %. В работе [27] формирование микрополос сдвига в УМЗ-сплаве Al6082 связывают с действием механизма зернограничного скольжения. Однако авторы работы [27] предлагают модель, в которой ЗГС развивается

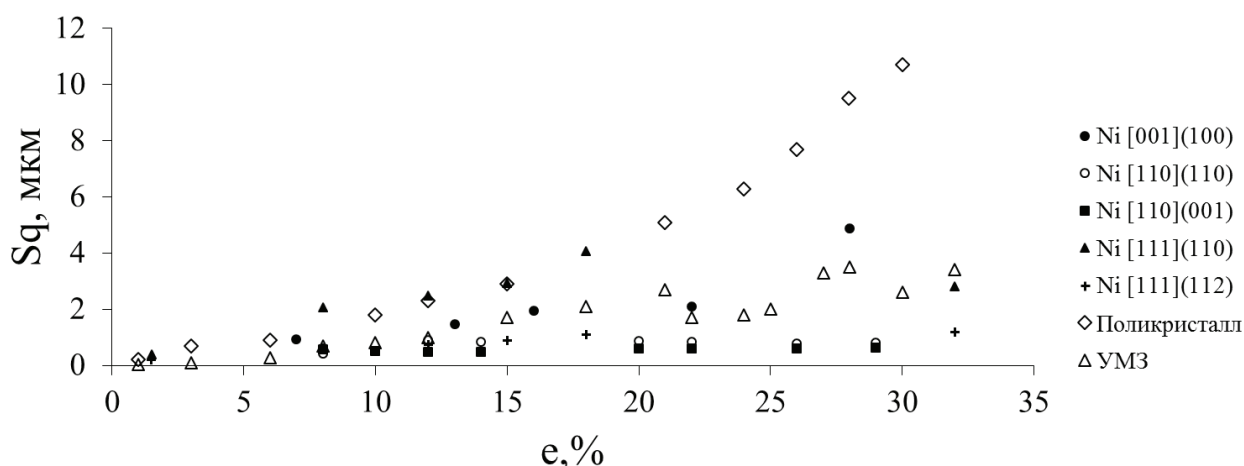


Рис. 6. Среднее квадратичное значение высоты
Fig. 6. Height root mean square value

только на начальных стадиях деформации, при дальнейшем нагружении структурные изменения в материале ограничивают ЗГС.

Выводы

Установлено и количественно подтверждено влияние внутренней структуры материала на морфологию поверхности в процессе нагружения.

Показана потенциальная возможность применения трехмерных параметров шероховатости для оценки ресурса материала и выявления возможного зарождения концентраторов напряжений на поверхности. Отрицательное значение асимметрии поверхности (Ssk) свидетельствует о наличии острых впадин на поверхности, что характерно для поликристаллов при достижении степени деформации 20 %.

Различия в деформационных механизмах монокристаллов (скольжение по октаэдрическим плоскостям), поликристаллов (внутризеренное и зернограничное скольжение) и материалов в УМЗ-состоянии (зернограничное скольжение) отражается в показателях шероховатости деформированной поверхности. Величина среднего квадратичного значения высоты Sq для поликристаллического агрегата на начальных этапах близка к значениям для монокристаллов и материалов в УМЗ-состоянии, но при достижении $\epsilon = 15...20$ % превышает их в два раза, а при достижении $\epsilon = 30$ % – в четыре раза.

Изменение фактора шероховатости Fr с увеличением степени деформации подчиняется экспоненциальному закону для $y = 0,002e^{0,16x}$, – для поликристаллов, $y = 0,001e^{0,17x}$ – для материалов в УМЗ-состоянии. Для монокристаллов Fr не превышает значения 0,05 во всем рассмотренном интервале нагружения.

Полученные в работе результаты расширяют фундаментальные знания о влиянии внутренней структуры материала на процессы деформации. Они могут быть использованы для математического моделирования поведения металлов под нагрузкой.

Список литературы

1. The effect of grain size on the localization of plastic deformation in shear bands / H.S. Ho, M. Risbet, X. Feaugasb, G. Moulin // Scripta Materialia. – 2011. – Vol. 65, iss. 11. – P. 998–1001. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2011.09.001.
2. Grain-scale micromechanics of polycrystal surfaces during plastic straining / D. Raabe, M. Sachtleber, H. Weiland, G. Scheele // Acta Materialia. – 2003. – Vol. 51. – P. 1539–1560. – DOI: 10.1016/S1359-6454(02)00557-8.
3. Extrusions and intrusions in fatigued metals. Pt. 2. AFM and EBSD study of the early growth of extrusions and intrusions in 316L steel fatigued at room temperature / J. Man, P. Klapetek, O. Man, A. Weidner, K. Obrtlík, J. Polaček // Philosophical Magazine. – 2009. – Vol. 89, iss. 16. – P. 1337–1372. – DOI: 10.1080/14786430902917624.
4. AFM and SEM-FEG study on fundamental mechanisms leading to fatigue crack initiation / J. Man, M. Valtr, M. Petrenec, J. Dluhoš, I. Kubešna,



K. Obrtlík, J. Polák // International Journal of Fatigue. – 2015. – Vol. 76. – P. 11–18. – DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.09.019.

5. Meng B., Fu M.W. Size effect on deformation behavior and ductile fracture in microforming of pure copper sheets considering free surface roughening // Materials and Design. – 2015. – Vol. 83. – P. 400–412. – DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.067.

6. Sangid M.D., Maier H.J., Sehitoglu H. A physically based fatigue model for prediction of crack initiation from persistent slip bands in polycrystals // Acta Materialia. – 2011. – Vol. 59, iss. 1. – P. 328–341. – DOI: 10.1016/j.actamat.2010.09.036.

7. Atypical “boomerang” slip traces in [001] niobium single crystals deformed at room temperature / D.S.H. Charrier, J. Bonneville, C. Coupeau, Y. Nahas // Scripta Materialia. – 2012. – Vol. 66, iss. 7. – P. 475–478. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2011.12.019.

8. A comparison of collective dislocation motion from single slip quantitative topographic analysis during in-situ AFM room temperature tensile tests on Cu and Fe₃C crystals / C. Kahloun, G. Monnet, S. Queyreau, L.T. Le, P. Franciosi // International Journal of Plasticity. – 2016. – Vol. 84. – P. 277–298. – DOI: 10.1016/j.ijplas.2016.06.002.

9. Topological analysis of {110} slip in an alpha-iron crystal from in situ atomic force microscopy / C. Kahloun, L.T. Le, G. Monnet, M.-H. Chavanne, E. Ait, P. Franciosi // Acta Materialia. – 2013. – Vol. 61, iss. 17. – P. 6459–6465. – DOI: 10.1016/j.actamat.2013.07.023.

10. Kramer D.E., Savage M.F., Levine L.E. AFM observations of slip band development in Al single crystals // Acta Materialia. – 2005. – Vol. 53, iss. 17. – P. 4655–4664. – DOI: 10.1016/j.actamat.2005.06.019.

11. The Evolution of slip morphology and fatigue crack initiation in surface grains of Ni200 / K.S. Chan, J.W. Tian, B. Yang, P.K. Liaw // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2009. – Vol. 40, iss. 11. – P. 2545–2556. – DOI: 10.1007/s11661-009-9980-4.

12. The fundamental relationships between grain orientation, deformation-induced surface roughness and strain localization in an aluminum alloy / M.R. Stoudt, L.E. Levine, A. Creuziger, J.B. Hubbard // Materials Science and Engineering: A. – 2011. – Vol. 530, iss. 1. – P. 107–116. – DOI: 10.1016/j.msea.2011.09.050.

13. Investigating the relationship between grain orientation and surface height changes in nickel polycrystals under tensile plastic deformation / K. Balusu, R. Kelton, E.I. Meletis, H. Huang // Mechanics of Materials. – 2019. – Vol. 134. – P. 165–175. – DOI: 10.1016/j.mechmat.2019.04.011.

14. Microstructure and mechanical properties of Cu and Cu-Zn alloys produced by equal channel angular pressing / Z.J. Zhang, Q.Q. Duan, X.H. An, S.D. Wu, G. Yang, Z.F. Zhang // Materials Science and Engineering: A. – 2011. – Vol. 528. – P. 4259–4267. – DOI: 10.1016/j.msea.2010.12.080.

15. Effects of dislocation slip mode on high-cycle fatigue behaviors of ultrafine-grained Cu-Zn alloy processed by equal-channel angular pressing / Z.J. Zhang, X.H. An, P. Zhang, M.X. Yang, G. Yang, S.D. Wu, Z.F. Zhang // Scripta Materialia. – 2013. – Vol. 68. – P. 389–392. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2012.10.036.

16. Mousavi S.E., Meratian M., Rezaeian A. Investigation of mechanical properties and fracture surfaces of dual-phase 60–40 brass alloy processed by warm equal-channel angular pressing // Journal of Materials Science. – 2017. – Vol. 52. – P. 8041–8051. – DOI: 10.1007/s10853-017-1006-9.

17. Characteristic features of physical and mechanical properties of ultrafine-grained Al–Mg alloy 1560 / V.A. Krasnoveikin, A. Kozulin, V.A. Skripnyak, E.N. Moskvichev, D.V. Lychagin // Inorganic Materials: Applied Research. – 2018. – Vol. 9, iss. 9. – P. 389–392. – DOI: 10.1134/S2075113318020168.

18. Sliding wear behavior of submicrocrystalline pure iron produced by high-pressure torsion straining / H. Kato, Y. Todaka, M. Umemoto, M. Haga, E. Sentoku // Wear. – 2015. – Vol. 336–337. – P. 58–68. – DOI: 10.1016/j.wear.2015.04.014.

19. Wear resistance and electroconductivity in copper processed by severe plastic deformation / A.P. Zhilyaev, I. Shakhova, A. Belyakov, R. Kaibyshev, T.G. Langdon // Wear. – 2013. – Vol. 305. – P. 89–99. – DOI: 10.1016/j.wear.2013.06.001.

20. ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Ареал. Ч. 2. Термины, определения и параметры структуры поверхности. – М.: Стандартинформ, 2015. – 47 с.

21. Lychagin D.V., Alfeyorova E.A. Slip as the basic mechanism for formation of deformation relief structural elements // Physics of the Solid State. – 2017. – Vol. 59, iss. 7. – P. 1433–1439. – DOI: 10.1134/S1063783417070137.

22. Micromechanical model of deformation-induced surface roughening in polycrystalline materials / V.A. Romanova, R. Balokhonov, A. Panin, M.S. Kazachenok, V.S. Shakhijanov // Physical Mesomechanics. – 2017. – Vol. 13, iss. 3. – P. 324–333. – DOI: 10.1134/S1029959917030080.

23. Alfeyorova E.A., Lychagin D.V. Self-organization of plastic deformation and deformation relief in FCC single crystals // Mechanics of Materials. – 2018. –

Vol. 117. – P. 202–213. – DOI: 10.1016/j.mechmat.2017.11.011.

24. Deformation behaviour of ultra-fine-grained copper / R.Z. Valiev, E.V. Kozlov, Yu.F. Ivanov, J. Lian, A.A. Nazarov, B. Baudelet // *Acta Metallurgica et Materialia*. – 1994. – Vol. 42. – P. 2467–2475. – DOI: 10.1016/0956-7151(94)90326-3.

25. Flow processes at low temperatures in ultrafine-grained aluminum / N.Q. Chinh, P. Szommerer, T. Csanádia, T.G. Langdon // *Materials Science and Engineering: A*. – 2006. – Vol. 434, iss. 1–2. – P. 326–334. – DOI: 10.1016/j.msea.2006.07.014.

26. Experimental evidence for grain-boundary sliding in ultrafine-grained aluminum processed by severe plastic deformation / N.Q. Chinh, P. Szommerer, Z. Horita, T.G. Langdon // *Advanced Materials*. – 2006. – Vol. 18, iss. 1. – P. 34–39. – DOI: 10.1002/adma.200501232.

27. Tensile deformation of an ultrafine-grained aluminium alloy: micro shear banding and grain boundary sliding / I. Sabirov, Y. Estrin, M.R. Barnett, I. Timokhina, P.D. Hodgson // *Acta Materialia*. – 2008. – Vol. 56. – P. 2223–2230. – DOI: 10.1016/j.actamat.2008.01.020.

Конфликт интересов

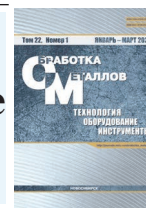
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Influence of the Material Structure on the Deformed Surface Morphology

Ekaterina Alfeyorova^{1, a}, Andrey Filippov^{2, b}

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

² Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0001-9579-6870>,  katerina525@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-0487-8382>,  andrey.v.filippov@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 24 October 2019

Revised: 27 December 2019

Accepted: 20 January 2020

Available online: 15 March 2020

Keywords:

Surface morphology

Deformation

Three-dimensional roughness

parameters

Single crystals

Polycrystals

Ultrafine-grained metals

Microstructure

Funding

The results were obtained with financial support from Fundamental Research Program of State Academies of Sciences for 2013-2020 (project No III.23.2.4). The research is supported by Tomsk Polytechnic University within the framework of Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement Program.

Acknowledgements

The authors thank Professor D. Lychagin for the samples of single crystals.

ABSTRACT

Introduction. Morphological changes in the free surface of materials during loading are interesting from a fundamental and practical point of view. In the first case, through the deformation relief, scientists judge the processes taking place inside the material, identify the deformation mechanisms, analyze the change in the stress-strain state, etc. In the second case, the deformation relief is an undesirable phenomenon, because it worsens fatigue resistance, adhesion, leads to cracking and reduces other physical and mechanical properties of machine parts. In addition, on the basis of the deformation relief, scientists try to evaluate the residual life of the machine parts. Today, industry uses materials in various structural conditions. The microstructure of the metal (the presence or absence of grains and grain boundaries, grain size, texture, crystallographic orientation, etc.) has a significant effect on the nature of the course of plastic deformation and the morphology of the deformed surface. **The purpose of the work** is to study the influence of the material structure on the evolution of the surface morphology during deformation. For this purpose, nickel samples in a single-crystal, polycrystalline, and ultrafine-grained state are investigated. **The methods of investigation** are mechanical compression tests, confocal laser scanning microscopy. Quantification is carried out using standardized three-dimensional roughness parameters. **Results and Discussion.** The paper shows the influence of the internal structure of the material on the evolution of the morphology of the deformation surface. Changes in the strain relief are discussed in terms of the prevailing strain mechanisms for each structural state of the material. It is shown that using three-dimensional roughness parameters, one can evaluate the presence of potential stress concentrators on the surface. It is determined that the presence of deep sharp depressions is most inherent in the material in a polycrystalline state. The results of the work can be useful for a reasoned choice of the microstructure of the material in the manufacture of machine parts and for mathematical modeling of the behavior of metals under load

For citation: Alfeyorova E.A., Filippov A.V. Influence of the Material Structure on the Deformed Surface Morphology. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 90–101. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-90-101. (In Russian).

* Corresponding author

Alfeyorova Ekaterina A., Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor
 National Research Tomsk Polytechnic University,
 30 Lenin Avenue,
 634050, Tomsk, Russian Federation
Tel.: +7-909-547-1201, **e-mail:** katerina525@mail.ru

References

1. Ho H.S., Risbet M., Feaugasb X., Moulin G. The effect of grain size on the localization of plastic deformation in shear bands. *Scripta Materialia*, 2011, vol. 65, iss. 11, pp. 998–1001. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2011.09.001.
2. Raabe D., Sachtler M., Weiland H., Scheele G. Grain-scale micromechanics of polycrystal surfaces during plastic straining. *Acta Materialia*, 2003, vol. 51, pp. 1539–1560. DOI: 10.1016/S1359-6454(02)00557-8.
3. Man J., Klapetek P., Man O., Weidner A., Obrtlík K., Polač J. Extrusions and intrusions in fatigued metals. Pt. 2. AFM and EBSD study of the early growth of extrusions and intrusions in 316L steel fatigued at room temperature. *Philosophical Magazine*, 2009, vol. 89, iss. 16, pp. 1337–1372. DOI: 10.1080/14786430902917624.
4. Man J., Valtr M., Petrenec M., Dluhoš J., Kubeňka I., Obrtlík K., Polák J. AFM and SEM-FEG study on fundamental mechanisms leading to fatigue crack initiation. *International Journal of Fatigue*, 2015, vol. 76, pp. 11–18. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.09.019.
5. Meng B., Fu M.W. Size effect on deformation behavior and ductile fracture in microforming of pure copper sheets considering free surface roughening. *Materials and Design*, 2015, vol. 83, pp. 400–412. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.067.
6. Sangid M.D., Maier H.J., Sehitoglu H. A physically based fatigue model for prediction of crack initiation from persistent slip bands in polycrystals. *Acta Materialia*, 2011, vol. 59, iss. 1, pp. 328–341. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.09.036.
7. Charrier D.S.H., Bonneville J., Coupeau C., Nahas Y. Atypical “boomerang” slip traces in [001] niobium single crystals deformed at room temperature. *Scripta Materialia*, 2012, vol. 66, iss. 7, pp. 475–478. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2011.12.019.
8. Kahloun C., Monnet G., Queyreau S., Le L.T., Franciosi P. A comparison of collective dislocation motion from single slip quantitative topographic analysis during in-situ AFM room temperature tensile tests on Cu and Fea crystals. *International Journal of Plasticity*, 2016, vol. 84, pp. 277–298. DOI: 10.1016/j.iplas.2016.06.002.
9. Kahloun C., Le L.T., Monnet G., Chavanne M.-H., Ait E., Franciosi P. Topological analysis of {110} slip in an alpha-iron crystal from in situ atomic force microscopy. *Acta Materialia*, 2013, vol. 61, iss. 17, pp. 6459–6465. DOI: 10.1016/j.actamat.2013.07.023.
10. Kramer D.E., Savage M.F., Levine L.E. AFM observations of slip band development in Al single crystals. *Acta Materialia*, 2005, vol. 53, iss. 17, pp. 4655–4664. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.06.019.
11. Chan K.S., Tian J.W., Yang B., Liaw P.K. The Evolution of slip morphology and fatigue crack initiation in surface grains of Ni200. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2009, vol. 40, iss. 11, pp. 2545–2556. DOI: 10.1007/s11661-009-9980-4.
12. Stoudt M.R., Levine L.E., Creuziger A., Hubbard J.B. The fundamental relationships between grain orientation, deformation-induced surface roughness and strain localization in an aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, vol. 530, iss. 1, pp. 107–116. DOI: 10.1016/j.msea.2011.09.050.
13. Balusu K., Kelton R., Meletis E.I., Huang H. Investigating the relationship between grain orientation and surface height changes in nickel polycrystals under tensile plastic deformation. *Mechanics of Materials*, 2019, vol. 134, pp. 165–175. DOI: 10.1016/j.mechmat.2019.04.011.
14. Zhang Z.J., Duan Q.Q., An X.H., Wu S.D., Yang G., Zhang Z.F. Microstructure and mechanical properties of Cu and Cu-Zn alloys produced by equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, vol. 528, pp. 4259–4267. DOI: 10.1016/j.msea.2010.12.080.
15. Zhang Z.J., An X.H., Zhang P., Yang M.X., Yang G., Wu S.D., Zhang Z.F. Effects of dislocation slip mode on high-cycle fatigue behaviors of ultrafine-grained Cu-Zn alloy processed by equal-channel angular pressing. *Scripta Materialia*, 2013, vol. 68, pp. 389–392. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2012.10.036.
16. Mousavi S.E., Meratian M., Rezaeian A. Investigation of mechanical properties and fracture surfaces of dual-phase 60–40 brass alloy processed by warm equal-channel angular pressing. *Journal of Materials Science*, 2017, vol. 52, pp. 8041–8051. DOI: 10.1007/s10853-017-1006-9.
17. Krasnoveikin V.A., Kozulin A., Skripnyak V.A., Moskvichev E.N., Lychagin D.V. Characteristic features of physical and mechanical properties of ultrafine-grained Al–Mg alloy 1560. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2018, vol. 9, iss. 9, pp. 389–392. DOI: 10.1134/S2075113318020168.
18. Kato H., Todaka Y., Umemoto M., Haga M., Sentoku E. Sliding wear behavior of submicrocrystalline pure iron produced by high-pressure torsion straining. *Wear*, 2015, vol. 336–337, pp. 58–68. DOI: 10.1016/j.wear.2015.04.014.
19. Zhilyaev A.P., Shakhova I., Belyakov A., Kaibyshev R., Langdon T.G. Wear resistance and electroconductivity in copper processed by severe plastic deformation. *Wear*, 2013, vol. 305, pp. 89–99. DOI: 10.1016/j.wear.2013.06.001.

20. State Standard 25178-2–2014. Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture. Profile method. Part 2: Terms, definitions and surface texture parameter. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 47 p. (In Russian).
21. Lychagin D.V., Alfeyorova E.A. Slip as the basic mechanism for formation of deformation relief structural elements. *Physics of the Solid State*, 2017, vol. 59, iss. 7, pp. 1433–1439. DOI: 10.1134/S1063783417070137.
22. Romanova V.A., Balokhonov R., Panin A., Kazachenok M.S., Shakhijanov V.S. Micromechanical model of deformation-induced surface roughening in polycrystalline materials. *Physical Mesomechanics*, 2017, vol. 13, iss. 3, pp. 324–333. DOI: 10.1134/S1029959917030080.
23. Alfeyorova E.A., Lychagin D.V. Self-organization of plastic deformation and deformation relief in FCC single crystals. *Mechanics of Materials*, 2018, vol. 117, pp. 202–213. DOI: 10.1016/j.mechmat.2017.11.011.
24. Valiev R.Z., Kozlov E.V., Ivanov Yu.F., Lian J., Nazarov A.A., Baudalet B. Deformation behaviour of ultra-fine-grained copper. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1994, vol. 42, pp. 2467–2475. DOI: 10.1016/0956-7151(94)90326-3.
25. Chinh N.Q., Szommera P., Csanádia T., Langdon T.G. Flow processes at low temperatures in ultrafine-grained aluminum. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, vol. 434, iss. 1–2, pp. 326–334. DOI: 10.1016/j.msea.2006.07.014.
26. Chinh N.Q., Szommera P., Horita Z., Langdon T.G. Experimental evidence for grain-boundary sliding in ultrafine-grained aluminum processed by severe plastic deformation. *Advanced Materials*, 2006, vol. 18, iss. 1, pp. 34–39. DOI: 10.1002/adma.200501232.
27. Sabirov I., Estrin Y., Barnett M.R., Timokhina I., Hodgson P.D. Tensile deformation of an ultrafine-grained aluminium alloy: micro shear banding and grain boundary sliding. *Acta Materialia*, 2008, vol. 56, pp. 2223–2230. DOI: 10.1016/j.actamat.2008.01.020.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).