

ления. Твердость зоны термического влияния плавно снижается до уровня твердости основного металла (180 HV).

Износостойкость наплавленных материалов определяли в условиях воздействия закрепленных абразивных частиц в соответствии с ГОСТ 17367-71. В качестве эталонного материала использовали титан ВТ1-0. Его износостойкость была принята за единицу. Анализ результатов эксперимента по определению износостойкости показал, что на образцах с поверхностно легированными слоями наблюдалось повышение износостойкости на 60-70 % по сравнению с износостойкостью основного металла. Твердый карбид титана, распределенный в вязкой титановой матрице, играет роль жестких включений, препятствующих изнашиванию материала. При наплавке второго слоя карбида титана наблюдается снижение износостойкости на 9 %. Данный эффект обусловлен высокой объемной долей частиц карбида титана в верхней части покрытия, которые выкрашиваются в процессе изнашивания.

Технология вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошков карбида титана позволяет эффективно упрочнять поверхностные слои титановых сплавов. Применение этой технологии обеспечивает получение качественных покрытий толщиной до 2,3 мм, отличающихся высоким уровнем твердости и износостойкости.

Литература.

1. E. Yun , K. Lee , S. Lee, Improvement of high-temperature hardness of (TiC, TiB)/Ti-6Al-4V surface composites fabricated by high-energy electron-beam , Surf. Coat. Technol. 184 (2004) 74–83.
2. M.J. Hamed, M.J. Torkamany, J. Sabbaghzadeh, Effect of pulsed laser parameters on in-situ TiC synthesis in laser surface treatment, Optics and Lasers in Engineering. 49 (2011) 557-563.
3. M.M. Savalani, C.C. Ng, Q.H. Li, H.C. Man, In situ formation of titanium carbide using titanium and carbon-nanotube powders by laser cladding, Appl. Surf. Sci. 258 (2012) 3173–3177.
4. I.A. Bataev, A.A. Bataev, M.G. Golkovski, D.S. Krivizhenko, A.A. Losinskaya, O.G. Lenivtseva. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding, Appl. Surf. Sci. 284 (2013) 472– 481.
5. I.A. Bataev, M.G. Golkovskii, A.A. Bataev, A.A. Losinskaya, R. Dostovalov, A.A. Popelyukh, E.A. Drobyaz, Surface hardening of steels with carbon by non-vacuum electron-beam processing, Surf. Coat. Technol. 242 (2014) 164–169.

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СКЛАДОВ

### В [111]-МОНОКРИСТАЛЛАХ МЕДИ ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ

*Д.В. Лычагин\*\*\* д.ф.-м.-н., профессор, А.В. Чумаевский\*\*, ст. препод.,*

*Е.А. Алфёрова\*, к.ф.-м.н., доцент*

*\* Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского  
Томского политехнического университета*

*652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26, тел. (38451) 6-22-48,*

*\*\*Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

*\*\*\*Томский государственный архитектурно-строительный университет*

*634003 г. Томск, пл. Соляная, 2,*

*E-mail: tch7av@rambler.ru, dvl-tomsk@mail.ru, katerina525@mail.ru*

### Введение

Образование складок на поверхности различных объектов отмечается во многих работах, часть которых касается рассмотрения деформации слоев породы в геологической среде [1-4]. Именно в геологии дана исчерпывающая классификация складок по морфологическому признаку и факторам, приводящим к их образованию, проведен анализ стадийности формирования складок.

Другая часть работ посвящена исследованию гофрирования, образования структуры и текстуры при прокатке материалов [5-8]. Авторы данных работ подробно рассмотрели процессы, происходящие в зоне контакта при прокатке материалов, а приводимые ими данные о разрушении образцов в соответствии с формирующейся текстурой подчеркивают высокую практическую значимость таких исследований.

Складки и гофрирование материалов являются одним из самых распространенных дефектов при штамповке, гибке и вытяжке на производстве. В частности, данное явление препятствует производству деталей сложной формы, с малым радиусом закругления и т.д. Управление складкообразованием позволит существенно увеличить номенклатуру изделий, выпускаемых различными предприятиями.

При образовании складок значительную роль играет поверхностный слой. Исследованию свойств поверхности твердого тела посвящены многие работы [9-15]. Поверхность твердого тела, как

следует из данных исследований, представляет собой самостоятельный мезомасштабный уровень деформации, обладающий наименьшей сдвиговой устойчивостью в нагруженном твердом теле [9]. Наличие свободной поверхности и высокая плотность вакансий и дислокаций поверхностного слоя позволяют выделить его как самостоятельный структурный элемент деформации. Авторы многих работ указывают на тот факт, что микропластические деформации в поверхностном слое начинают происходить при напряжениях, меньших предела текучести. Это позволяет рассматривать деформацию твердого тела как иерархическое взаимодействие «упруго деформированного основного кристалла» и «пластически деформированного поверхностного слоя». Избыточная деформация поверхностного слоя, как показано в [11], обуславливает его гофрирование и появление складчатой структуры.

В работе [13] показано появление особого вида складчатой структуры – обратимых складок, исчезающих после снятия нагрузки. В работе [15] установлено, что начиная с малых степеней деформации на поверхности твердых тел зарождаются дефекты различного структурно-масштабного уровня.

В работах, касающихся изучения развития деформационного рельефа при сжатии монокристаллических образцов [16-17], указывается на то, что складки являются его неотъемлемой частью. Как следует из данных работ, наблюдаются складки микро-, мезо- и макроскопического размера. Наиболее благоприятной ориентировкой оси сжатия монокристаллов для образования складок является ориентация  $[\bar{1}11]$  с ориентацией боковых граней  $(1\bar{1}2)$ . Также отмечается, что складки имеют более тонкую структуру, поэтому исследования образования складок необходимо вести на различных масштабных уровнях. Деформационные складки образуются неравномерно по площади боковых граней, а в нескольких основных частях и группируются в системы складок и изгибные полосы.

Исследование физической природы образования складок на монокристаллах представляется целесообразным в виду определенности геометрии дислокационного скольжения и отсутствия влияния границ зерен. Отметим, что изучение явления складкообразования может способствовать более углубленному пониманию механизмов релаксации и аккомодации поверхностных напряжений при различных методах деформации и обработки поверхности.

Исходя из вышеперечисленного, представляется важным исследование формирования складок на боковых поверхностях монокристалла и анализ условий их образования.

#### **Материал и методика исследования**

В качестве материала исследования была выбрана медь. Медь обладает средним значением энергии дефекта упаковки ( $40 \dots 60$  мДж/м<sup>2</sup>). Исследовали монокристаллы меди технической чистоты, выращенные по методу Бриджмена. Для испытаний готовили образцы размером 3x3x6 мм в форме прямоугольного параллелепипеда с ориентацией оси сжатия  $[\bar{1}11]$ . Данные образцы имеют максимальную склонность к складкообразованию. Кристаллографическая схема ориентации октаэдрических плоскостей сдвига относительно оси деформации и боковых граней показана на рис.1.

Ориентировку монокристаллов проводили на рентгеновском дифрактомере с точностью 0,02°. Поверхность монокристаллов готовили механическим шлифованием с последующей электролитической полировкой в 5% растворе плавиковой кислоты в ортофосфорной кислоте. Деформацию образцов осуществляли сжатием при комнатной температуре с применением графитовой смазки со скоростью  $3 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup> на установке Instron ElektroPuls E10000. Исследования деформационного рельефа в масштабе всего образца проводили на оптическом микроскопе LeicaDM 2500P. Сдвиговую картину на поверхности складок изучали на растровом электронном микроскопе TESCAN VEGA II LMU. Параметры деформационного рельефа определяли на микроинтерферометре NewView 7200. Картина сдвига изучалась на всех боковых гранях образца при деформациях 4, 13, 19 и 25%.

#### **Геометрические закономерности распределения деформационных складок на боковых гранях $[\bar{1}11]$ -монокристалла при сжатии**

Деформационные складки на боковых гранях  $(1\bar{1}2)$  начинают формироваться при 4% деформации. На данном этапе это небольшие по высоте плавные выступы округлой формы (рис. 1, а, б). Выделяются области со складками, формирующимися преимущественно под углом  $\sim 90^\circ$  к следам от сдвига по плоскости  $(11\bar{1})$  (I на рис. 1, б). Также складки образуются по контуру формирующегося изгиба на боковой грани (III на рис. 1, б). В области II складки образуются перпендикулярно оси сжатия. Кроме складок составляющими деформационного рельефа на боковых гранях  $(1\bar{1}2)$  являются макрополосы деформации  $MB_{(11\bar{1})}$ , системы прямолинейных следов сдвига  $SB_{(11\bar{1})}$  и  $SB_{(\bar{1}\bar{1}\bar{1})}$ . На боковых гранях  $(110)$  деформационный рельеф при данной деформации представлен исключительно следами от сдвига и макрополосами деформации по плоскостям  $(11\bar{1})$  и  $(\bar{1}1\bar{1})$  (рис.2, с, d).

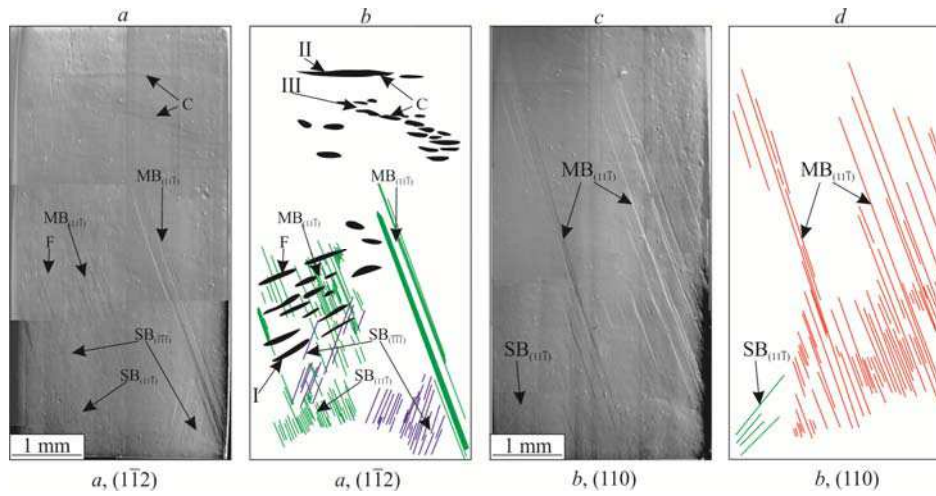


Рис. 1. Снимки (a, c) и схемы (b, d) деформационного рельефа на гранях образца при деформации 4%

При деформации, составляющей 13%, складки на боковых гранях  $(1\bar{1}2)$  занимают 65% площади грани. При увеличении степени деформации ранее образованные системы складок продолжают развитие и появляются новые складки. Большинство складок формируется в нижней части грани  $a$ ,  $(1\bar{1}2)$  вследствие изгиба образца ( $F$  на рис. 2,  $a, b$ ) и в нижней части грани. Группирующиеся складки могут формировать изгибные полосы в центральной части грани или в приторцевой области ( $BB_{III}$  и  $BB_b$ ,  $BB_{II}$  на рис. 2,  $a, b$ ). На боковой грани  $b$ ,  $(110)$  формируется три основных системы складок. Одна из которых представлена изогнутыми складками в области, соответствующей максимальному изгибу грани  $a$ ,  $(1\bar{1}2)$  ( $F$  на рис. 2,  $b, c$ ). Две других системы находятся в приторцевых областях и формируют изгибные полосы ( $BB_I$  и  $BB_{II}$  на рис. 2,  $b, c$ ). Наряду с изгибной полосой  $BB_{II}$  наблюдается образование вторичных изгибных полос  $BB_{II-1}$  и  $BB_{II-2}$ .

При деформации исследуемых образцов в промежутке  $\epsilon = 13...19...25\%$  новых систем складок на боковых гранях  $(110)$  практически не образуется. Развитие уже сформированных систем складок в основном идет на гранях  $(1\bar{1}2)$ , а на гранях  $(110)$  они развиваются в меньшей степени. Остальные элементы деформационного рельефа также не демонстрируют существенного развития. В частности, не обнаружено «новых» макрополос деформации по основным системам сдвига и развития ранее образованных макрополос.

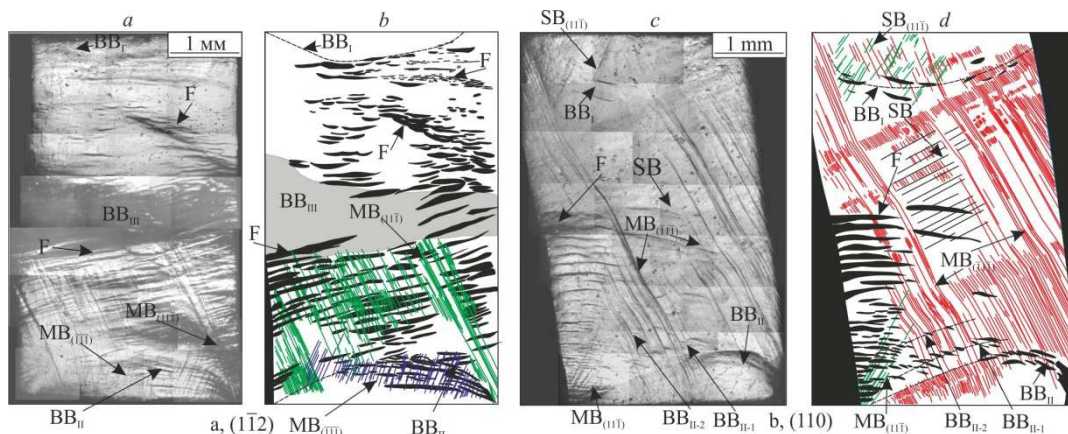


Рис. 2. Снимки (a, c) и схемы (b, d) деформационного рельефа на гранях образца при деформации 13%

Большинство складок при деформации образуются на гранях  $(1\bar{1}2)$ , где они занимают до 80-85% площади. Складки на гранях  $(110)$  наблюдаются только при 13% деформации. Доля площади, занимаемая складками на этой грани, составляет 30-35%. Такую закономерность можно объяснить

следующим образом. Во-первых, плоскости и направления сдвига расположены симметрично относительно плоскости  $(1\bar{1}2)$ . По отношению к плоскости  $(110)$  симметричность такого расположения отсутствует. Развитие сдвига приводит к искривлению, в первую очередь, грани  $(1\bar{1}2)$ . Это приводит к тому, что на данной грани наблюдается наиболее раннее складкообразование.

Таким образом, складки в монокристаллах меди с ориентацией оси сжатия  $[\bar{1}11]$  являются структурным элементом деформационного рельефа. Их формирование отражает особенности деформационных процессов, происходящих как на поверхности, так и в объеме образца. Они могут быть использованы наряду с другими элементами деформационного рельефа для анализа характера деформации при сжатии монокристаллов. Анализ геометрического положения складок будет неполным без установления закономерностей сдвиговых процессов, приводящих к их образованию, и классификации складок.

#### Картина сдвига на поверхности деформационных складок

Несмотря на сложность формы, складки, как и другие элементы деформационного рельефа, в своем образовании претерпевают схожие превращения. Монокристаллическая медь, как ГЦК-металл со средним значением энергии дефекта упаковки, деформируется при комнатной температуре дислокационным скольжением по плотноупакованным  $\{111\}$  плоскостям и  $\langle 110 \rangle$  направлениям. Образование складок в поверхностном слое также может быть связано с дислокационным скольжением. Низкая сдвиговая устойчивость поверхностного слоя способствует сдвигу при меньших напряжениях [12]. Следовательно, складки, как элементы, зависимые от таких напряжений и условий образования, могут формироваться различного размера и формы.

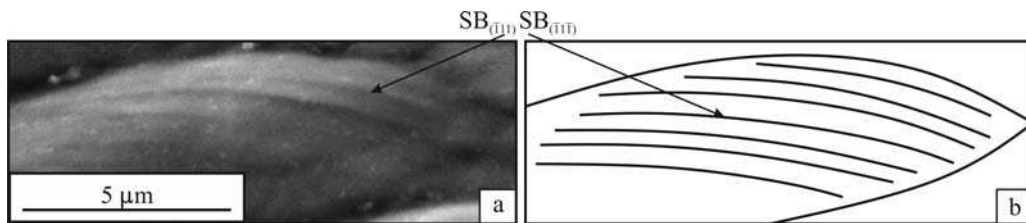


Рис. 3. Мезоскладка на боковой грани  $c$ ,  $(1\bar{1}2)$  при деформации 25% (здесь и далее:  $a$  – снимок,  $b$  – схема)

На рис. 3 приведен снимок отдельной мезоскладки из системы и её схема. Видно, что складка содержит следы от сдвига по одной плоскости и имеет форму, стремящуюся к линзовидной. При этом хорошо выделяются верхний и нижний края складки. Кристаллографический анализ показывает, что данные следы могут быть образованы скольжением по плоскостям сдвига  $(\bar{1}1\bar{1})$  или  $(\bar{1}11)$ . Если принять во внимание, что складки образуются не по одной, а формируются системы складок, то положение границы складки может определяться также положением соседних складок, а, следовательно, и других мест концентрации напряжений. Распределение складок в группе определяется характером изменения напряжений в области формирования складок.

Складки рассмотренного выше типа образуются в области, где следы сдвига до образования складок не наблюдались. В условиях, когда образованию складок предшествовал сдвиг по одной из возможных систем скольжения, формируются складки другого типа. На рис. 4 представлена начальная стадия формирования таких складок. Следы от сдвига  $SB_{(11\bar{1})}$  образовались первично, а следы от сдвига  $SB$  образовались при дальнейшей деформации. Одна граница складки является четкой, вторая граница плавная. Следы  $SB_{(11\bar{1})}$  в области второй системы изогнуты, но на данном этапе ещё непрерывны.

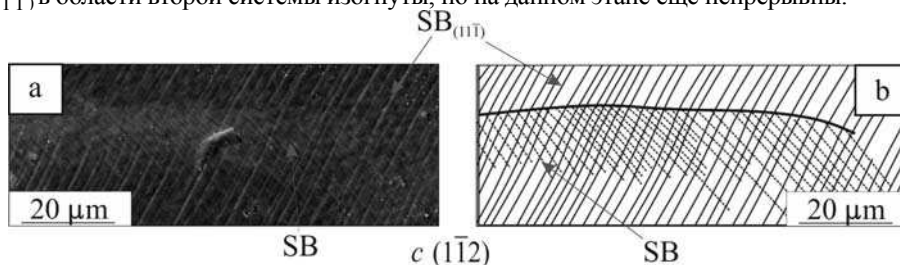


Рис. 4. Складка на начальной стадии формирования на боковой грани  $c$ ,  $[\bar{1}11](1\bar{1}2)$

При рассмотрении систем складок данного вида в развитом состоянии (рис. 5), можно отметить следующие особенности. Нижняя граница одной складки либо неопределенная, либо является верхней для другой. Складки образуются преимущественно квазипараллельно друг другу. Одна из сторон складки является более пологой, а вторая более крутой относительно грани. При этом, более крутая сторона складки образована сдвигом по плоскости, действующей последней. Следы от сдвига по второй плоскости наблюдаются и за пределом края складки, но в меньшем количестве, хотя и с образованием в отдельных частях довольно крупных элементов (рис. 5). На данном этапе развития складок в области действия второй системы уже не наблюдаются следы от сдвига по первой.

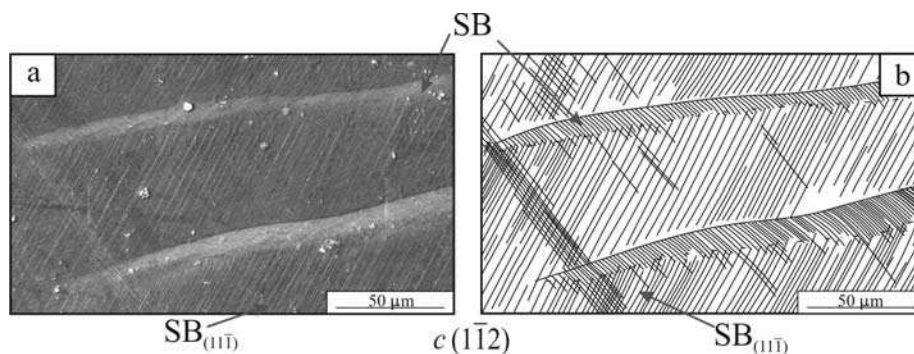


Рис. 5. Складки на боковой грани  $c, (1\bar{1}2)$  при деформации 25%

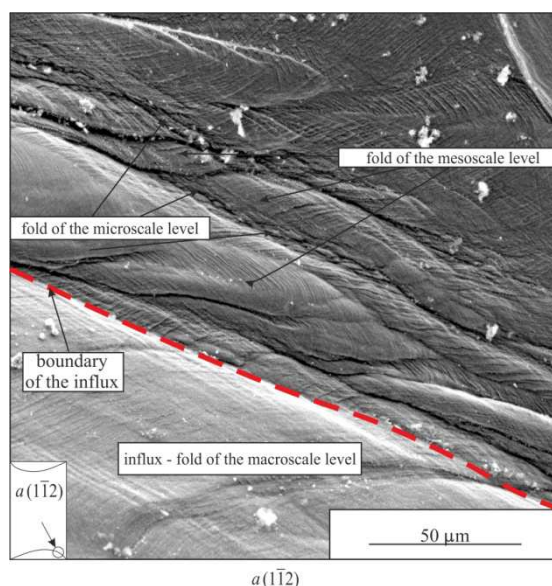


Рис. 6. РЭМ изображение отдельной части изгибной полосы на грани  $a, (1\bar{1}2)$

Особое место в складчатой структуре, образуемой на боковых гранях исследуемых образцов, занимают изгибные полосы (рис. 6). В данном случае наблюдается более сложное течение материала, вследствие наличия большого количества факторов, обуславливающих деформацию поверхностного слоя. Основным из них является наличие торцевого трения, приводящее к реализации схемы неравномерного всестороннего сжатия, что приводит к образованию наплывов в приторцевой зоне образца. В свою очередь наплыв при дальнейшей деформации обуславливает неоднородность процессов на его границе. Условия пластического течения в такой области являются стесненными. Направления расположения отдельных складок обусловлены, прежде всего, формой границ области образования. Поверхность самого наплыва также подвержена складкообразованию.

Прослеживается взаимосвязь масштабных уровней складчатой структуры. Приторцевой наплыв – макроскопическая складка. На границе этой складки создается область со сложными стесненными условиями деформации, в которой образуются складки мезоуровня. Мезоскладки в свою очередь в граничной области также приводят к образованию более мелких – микроскладок. Таким обра-



зом, появления концентратора напряжений на более высоком структурно-масштабном уровне приводит к появлению концентраторов на более низких уровнях.

**Заключение**

Деформационные складки на боковых гранях монокристаллов с ориентацией оси сжатия  $[\bar{1}11]$  являются неотъемлемым элементом рельефа наряду с макрополосами деформации. Первоначально образуются складки в областях изгиба и по контуру наплывов в приторцевой области. Вторичное складкообразование происходит в стесненной области между образованными складками. В основном образование мезоскладок происходит при создании изначального макроизгиба образца, при дальнейшей деформации в областях между мезоскладками формируются микроскладки. Проведенный анализ показывает необходимость в определении физической природы формирования складок и их классификации на различных масштабных уровнях.

***Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы развития ВИУ ТГУ Министерства образования и науки РФ и гранта РФФИ №13-02-98034 р\_сибирь\_а.***

**Литература.**

1. Huddleston P.J. Fold morphology and some geometrical implications of the theories of fold development // *Tectonophysics*. V. 16. P. 1-46.
2. Ramsay J.G., Huber M.I., The techniques of modern structural geology. V.2. Fold and fractures, London, N.Y.: Academic Press, 1987.
3. Williams C.D., Chapman T.J. The geometrical classification of non-cylindrical fold // *J. Struct. Geol.*, 1979, V.1, No.3, P. 181-186.
4. Huddleston P.J. Fold morphology and some geometrical implications of the theories of fold development // *Tectonophysics*, 1973, V. 16, P. 1-46.
5. V.V. Gubernatorov, B.K. Sokolov, I.V. Gervasyeva, L.R. Vladimirov. Formation of band structures in homogeneous materials under deformation // *Phys. Mesomech.*, 2, No. 1-2 (1999) 147.
6. Gubernatorov V.V., Sokolov B.K., Sbitnev A.K., Vladimirov L.R., Gervasyeva I.V. Band structure formation in metals under deformation // *Textures and Microstructures*. - 1999. - V. 32. - №. 1-4. - P. 41-45.
7. V.V. Gubernatorov, L.R. Vladimirov, T.S. Sycheva, D.V. Dolgikh. The corrugation phenomenon and formation of strained and recrystallized structure and texture in metallic materials. Part I. A geometric model of plastic flow of rolled heterogeneous media // *Phys. Mesomech.*, 4, No. 5 (2001) 89.
8. Sokolov B.K., Sbitnev A.K., Gubernatorov V.V. et al. On the influence of the annealing heating rate on the recrystallization texture of a deformed single crystal (110)[001] of 3 % silicon iron // *Textures and Microstructures*. - 1995. - V. 26-27. - P. 427-443.
9. V.E. Panin. Surface layers of solids as a mesoscopic structural level of deformation // *Phys. Mesomech.*, 4, No. 3 (2001) 5.
10. Panin V.E. *Metal Science and Heat Treatment*, 47, №7, 2005, P 312-318.
11. V.E. Panin, A.V. Panin. Effect of the surface layer in a solid under deformation // *Phys. Mesomech.*, 8, No. 5-6 (2005) 7.
12. V.E. Panin. Physical mesomechanics of solid surface layers // *Phys. Mesomech.*, 2, No. 6 (1999) 5.
13. S.V. Panin, P. Neumann, Sh.A. Baibulatov. Investigation on mesoscale deformation of intermetallic Ni63Al37 alloy under compression // *Phys. Mesomech.*, 3, No. 1 (2000) 75.
14. A.V. Panin, V.A. Klimenov, Yu.I. Pochivalov, A.A. Sonin. Effect of surface layer state on plastic flow and strength of low-carbon steel // *Phys. Mesomech.*, 4, No. 4 (2001) 81.
15. P.V. Kuznetsov, V.E. Panin. Direct observation of flows of defects and of nm-range localization of deformation on duralumin surface with the aid of scanning tunnel and atom force microscopes // *Phys. Mesomech.*, 3, No. 2 (2000) 85.
16. Lychagin D.V. Fragmentation of plastically deformed fcc metallic materials, *Phys. Mesomech.*, 9, No. 3-4 (2006) 95-105.
17. Lychagin D.V., Alfeyorova E.A., Starenchenko V.A. Effect of crystallographic states on the development of macrobands and deformation inhomogeneity in [111] nickel single crystals // *Physical mesomechanics*. - 2011. - V. 14. - No.1-2. - P. 66-78.