

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 538.91

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.003

КРИСТОННАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ТИПИЧНЫХ КОМПОНЕНТ ТЕКСТУРЫ ПРОКАТКИ МЕТАЛЛОВ С КУБИЧЕСКОЙ РЕШЕТКОЙ

Михаил Петрович Кашенко^{1†}, Наталья Альбертовна Скорикова²,
Анна Геннадьевна Семеновых³, Алексей Викторович Нефедов⁴,
Надежда Михайловна Кашенко⁵, Вера Геннадиевна Чашина⁶

^{1, 5, 6} Уральский федеральный университет им. Первого Президента России Б. Н. Ельцина, ул. Мира, 2, 620002, Екатеринбург, Россия

^{1, 2, 3, 4, 6} Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт 37, 620100, Екатеринбург, Россия

¹ mpk46@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-2611-2858>

² skorikova@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3217-6030>

³ semenovyhag@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3467-1833>

⁴ a.nefedov@live.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1526-9163>

⁵ nad.kashenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2362-5567>

⁶ vera.chashina.77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7480-2562>

Аннотация. В процессе пластической деформации прокаткой поликристаллические образцы с первоначально хаотической ориентацией кристаллических решеток зерен, как правило, текстурируются, то есть появляется несколько выделенных вариантов ориентаций решеток в зернах, при которых вполне определенные плоскости составляют наименьшие углы с плоскостью прокатки. При интерпретации наблюдаемых типичных текстур для кристаллов с кубическими решетками показано, что наглядное описание текстур достигается в рамках кристонного подхода. Суть кристонного подхода, связанного с контактным взаимодействием дислокаций при пересечении плоскостей скольжения, кратко приводится в разделе, посвященном основной компоненте текстуры в кристаллах с гранцентрированной кубической решеткой. Далее приведена информация о типичных текстурах в кристаллах с объемно центрированной кубической решеткой и представлен для каждой из текстур «состав» кристонов, отражающий долевым вклад дислокаций, принадлежащих к взаимодействующим системам скольжения. При обсуждении результатов показано, что имеются основания рассматривать формирование наблюдаемых текстур как следствие стремления открытой неравновесной системы релаксировать к положению равновесия кратчайшим во времени способом. Этот вывод эквивалентен принципу Циглера о максимуме производства энтропии для открытых систем, далеких от положения равновесия.

Ключевые слова: компоненты текстуры, дислокации, кристоны, полосы сдвига, принцип Циглера.

Благодарности: Авторы выражают благодарность Министерству науки и высшего образования России за поддержку в выполнении государственного задания № 075-00243-20-01 от 26.08.2020 в рамках темы «Экологические аспекты рационального природопользования».

Для цитирования: Кашенко М.П., Скорикова Н.А., Семеновых А.Г., Нефедов А.В., Кашенко Н.М., Чашина В.Г. Кристонная модель формирования типичных компонент текстуры прокатки металлов с кубической решеткой // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 2. С. 165–171. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.003.

Original article

A CRYSTON MODEL FOR THE FORMATION OF TYPICAL COMPONENTS OF THE ROLLING TEXTURE IN A METAL WITH A CUBIC LATTICE

Mikhail P. Kashchenko^{1†}, Natalya A. Skorikova², Anna G. Semenovych³, Alexey V. Nefedov⁴,
Nadezhda M. Kashchenko⁵, Vera G. Chashchina⁶

^{1, 5, 6} Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Mira Str., 19, Yekaterinburg, 620002, Russia

^{1, 2, 3, 4, 6} Ural State Forest Engineering University, Sybirskiy Tract Str., 37, Yekaterinburg, 620100, Russia

¹ mpk46@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-2611-2858>

² skorikova@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3217-6030>

³ semenovychag@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3467-1833>

⁴ a.nefedov@live.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1526-9163>

⁵ nad.kashchenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2362-5567>

⁶ vera.chashchina.77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7480-2562>

Abstract. In the process of plastic deformation by rolling, polycrystalline samples with initially chaotic orientation of the crystal lattices of grains, as a rule, are textured, that is, several selected variants of lattice orientations in grains appear, in which well-defined planes make up the smallest angles with the rolling plane. When interpreting the observed typical textures for crystals with cubic lattices, it is shown that a visual description of the textures is achieved within the framework of the cryston approach. The essence of the cryston approach associated with the contact interaction of dislocations at the intersection of glide planes is briefly described in the section devoted to the main component of the texture in crystals with a face-centered cubic lattice. In the following, information is provided about typical textures in crystals with a volume-centered cubic lattice, and for each of the textures, the "composition" of crystons is presented, reflecting the partial contribution of dislocations belonging to interacting sliding systems. When discussing the results, it is shown that there are reasons to consider the formation of the observed textures as a consequence of the tendency of an open nonequilibrium system to relax to the equilibrium state in the shortest possible way in time. This conclusion is equivalent to Ziegler's principle of maximum entropy production for open systems far from the equilibrium position.

Keywords: texture components, dislocations, kristons, shear bands, Ziegler principle.

Acknowledgements: The authors express their gratitude to the Ministry of Science and Higher Education of Russia for their support in the execution of state assignment No. 075-00243-20-01 dated 26.08.2020 within the framework of the theme FEUG-2020-0013 "Environmental aspects of rational nature management".

For citation: Kashchenko, M. P., Skorikova, N. A., Semenovych, A. G., Nefedov, A. V., Kashchenko, N. M. & Chashchina, V. G. (2022). A cryston model for the formation of typical components of the rolling texture in a metal with a cubic lattice. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 2(19), 165–171. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.003.

Введение

При деформации поликристаллических металлов и сплавов, имеющих случайную исходную ориентировку кристаллических решеток зерен, возникает преимущественная ориентировка определенных плоскостей и направлений в разных зернах, называемая кристаллографической текстурой. Текстура прокатки образуется в результате действия сил сжатия в направлении, перпендикулярном плоскости прокатки, и сил растяжения вдоль направления прокатки. В результате определенные плоскости $\{hkl\}$ в зернах оказываются близкими к плоскости прокатки, а некоторые направления $\langle uvw \rangle$ (в плоскостях $\{hkl\}$) – близкими к направлениям

растяжения в плоскости прокатки. Указанием таких плоскостей и направлений и задается наблюдаемая текстура. В металлах и сплавах с кубическими решетками (гранцентрированными – ГЦК и объемно-центрированными – ОЦК), как известно (см., например, [1, 2]), наблюдаются заметные различия в наборах типичных компонент текстуры прокатки. Это вполне естественно, если учесть, что при прокатке инициируются системы дислокационного скольжения, вступающие во взаимодействие по мере нарастания пластической деформации (степени прокатки). Действительно, в ГЦК-кристаллах имеется только одно исходное семейство систем скольжения $\{111\}\langle 110 \rangle$ по плотноупакованным плоскостям $\{111\}$, тогда

как в ОЦК-кристаллах (не имеющих плотноупакованных плоскостей) есть три примерно равноправных семейства: $\{110\}\langle 111\rangle$, $\{112\}\langle 111\rangle$, $\{113\}\langle 111\rangle$. Кристаллографические обозначения приводятся в базисе, связанном с ребрами кубической элементарной ячейки. Фигурные скобки используются для плоскостей семейства, круглые скобки – для отдельной плоскости. Угловые скобки используются для семейства направлений, а квадратные – для отдельного направления. Ясно, что деформация прокатки (при ортогональных направлениях сжатия и растяжения) должна сопровождаться разворотом доминирующих плоскостей скольжения в направлении уменьшения угла между плоскостью скольжения и плоскостью прокатки. Причем выраженная текстура развивается при значительных деформациях (десятки процентов). В этих условиях даже в зернах с начальной ориентацией решетки, выделяющей единственную систему скольжения, в ходе деформации неизбежно инициируются новые системы с плоскостями скольжения, пересекающимися с первоначальной для данного зерна. В связи с этим допустим сценарий формирования текстуры за счет распространения кристонов – носителей сдвига по плоскостям, отличающимся от исходных плоскостей скольжения [3-6]. Генерация кристонов осуществляется обобщенными источниками Франка-Рида (ОИФР), возникающими при сильном (контактном) взаимодействии дислокаций с пересекающимися плоскостями скольжения. Естественно ожидать тогда, что именно плоскости, по которым распространяются кристоны, входят в набор типичных наблюдаемых компонент текстуры.

Цель данной работы показать, что типичным наблюдаемым текстурам прокатки в кристаллах с кубическими решетками сопоставляются, как правило, простейшие реализации кристонов, возникающих при парных пересечениях исходных систем скольжения.

Кристонная схема описания основной компоненты текстуры прокатки в кристаллах с ГЦК-решеткой

Прежде всего, отметим, что типичные компоненты текстуры, наблюдаемой в ГЦК-кристаллах, относятся к вариантам $\{hh\ell\}\langle \ell\ell-2h\rangle$. Несмотря на то, что сдвиговая деформация зависит от энергии дефекта упа-

ковки, основная компонента текстуры обычно соответствует варианту $\{110\}\langle -112\rangle$.

Напомним [4-6], что при кристонном описании ориентаций границ полос сдвига ориентация нормали \mathbf{N} к плоскости скольжения задается векторным произведением \mathbf{b} и Λ

$$\mathbf{N} \parallel [\mathbf{b}, \Lambda]. \quad (1)$$

В (1) \mathbf{b} – это суперпозиционный вектор Бюргерса

$$\mathbf{b} \parallel n\mathbf{b}_1 + m\mathbf{b}_2, \quad (2)$$

лежащий в плоскости нормалью \mathbf{N} , n и m – целые числа, модули которых равны числу дислокаций двух контактно взаимодействующих систем, а векторы \mathbf{b}_1 и \mathbf{b}_2 лежат в пересекающихся плоскостях легкого скольжения и коллинеарны $\langle 110\rangle$. Вектор Λ коллинеарен линии пересечения пары плоскостей легкого скольжения, то есть в случае ГЦК-решетки

$$\Lambda \parallel \langle -1-10\rangle. \quad (3)$$

Из (1) следует, что ориентация \mathbf{N} зависит только от краевой (по отношению к Λ) составляющей вектора \mathbf{b} .

Очевидно, что добавление к суперпозиционному вектору \mathbf{b} произвольного по величине вектора \mathbf{b}_\parallel , коллинеарного Λ , не сказывается на выполнении условия (1), поскольку вектор \mathbf{b}_\parallel ортогонален любому направлению \mathbf{N} . Значит, при определении вектора \mathbf{b} , имеется аддитивная неоднозначность:

$$\mathbf{b} \rightarrow \mathbf{b}' = \mathbf{b} + \mathbf{b}_\parallel. \quad (4)$$

Для ГЦК-решетки, обладающей только одним семейством систем скольжения $\{111\}\langle 110\rangle$, простейшие (стандартные) ориентировки плоскостей скольжения, отличающихся от октаэдрического скольжения, следуют из (1)- (3) и имеют вид:

$$\{hh\ell\}, \quad h/\ell = (n - m)/(n + m). \quad (5)$$

Для иллюстрации на рис.1 приведена схема образования дислокационного «жгута» двух систем дислокаций вдоль линии пересечения $\Lambda \parallel \langle -1-10\rangle$ пары плоскостей скольжения. Этот «жгут» играет роль сегмента ОИФР, характеризующего суперпозиционным векторам Бюргерса \mathbf{b} (2).

На рис.1 использовано непринципиальное упрощение: принято, что векторы \mathbf{b}_1 и \mathbf{b}_2 имеют чисто краевую ориентацию по отношению к рабочему сегменту ОИФР. Ясно, что выгибание сегмента ОИФР превращает барьер типа Ломера-Коттрелла в источник дислокаций, скользя-

щих по плоскостям $(hh\ell)$, которым принадлежит \mathbf{b} .

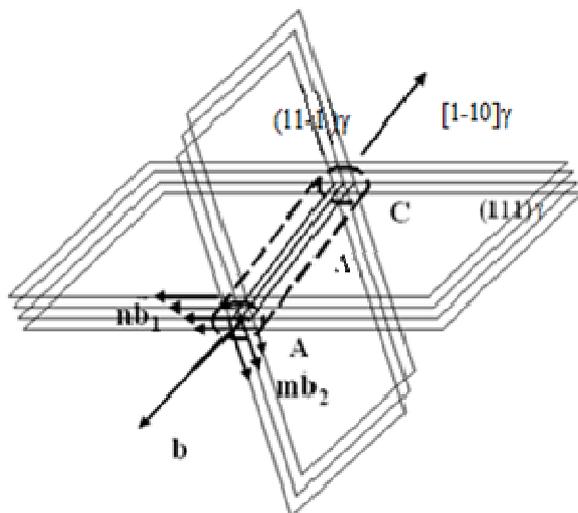


Рис.1. Формирование рабочего сегмента ОИФР

Fig.1. Formation of the working segment of the OIFR

Очевидно, что чисто винтовая компонента \mathbf{b}_{\parallel} (коллинеарная Λ), не изменяя ориентацию \mathbf{N} , обеспечивает возможность подключения дополнительных дислокаций (за счет механизма их поперечного скольжения). Следует иметь в виду, что случаю $h < \ell$, согласно (5), соответствует (при $n > 0$ и $m > 0$) неравенство $n > m$ и тупоугольное расположение векторов \mathbf{b}_1 и \mathbf{b}_2 , что обеспечивает минимум упругой энергии при сложении векторов, согласно критерию Франка ($b^2 < b_1^2 + b_2^2$), то есть устойчивость кристона. Тогда неравенствам $n > 0$, $m < 0$, сопоставляется остроугольное расположение векторов \mathbf{b}_1 и \mathbf{b}_2 , и $b^2 > b_1^2 + b_2^2$. Это означает, что при замене $m \rightarrow -m$ формулу (5) можно переписать в виде

$$h / \ell = (n + m) / (n - m), \quad (6)$$

полагая затем $n > 0$, $m > 0$ и $n > m$, что ведет к неравенству $h > \ell$. Существует и вариант ортогональных векторов \mathbf{b}_1 и \mathbf{b}_2 ($b^2 = b_1^2 + b_2^2$). Согласно (6), плоскостям $\{110\}$ основной компоненты текстуры, отвечает предельный вариант $n = m$. Это означает, что в равной степени используются возможности обеих взаимодействующих систем скольжения для релаксации напряжений, создаваемых внешней нагрузкой. Заметим также, что при $n = -m$ в (6) (что эквивалентно $n=m$ в (5)) реализуется другой предельный вариант плоскостей $\{001\}$ кубического скольжения. Ясно также, что направлению $\langle -112 \rangle$ соответствует максимальное из значений возможных модулей суперпозиционных

величин векторов Бюргерса. Действительно, зададим векторы Бюргерса в единицах $a/\sqrt{2}$, где a – параметр решетки, и рассмотрим конкретный пример. Выпишем, согласно (2), векторы суперпозиционных векторов \mathbf{b} для ОИФР, образующихся при взаимодействии дислокаций, принадлежащих плоскостям скольжения (111) (с векторами $\mathbf{b}_1=[10-1]$, либо $[01-1]$) и плоскостям (11-1) (с векторами $\mathbf{b}_2=[101]$, либо $[011]$). Тогда плоскостям (110) соответствуют $\mathbf{b}=[-112]$, $[1-12]$ либо $\mathbf{b}=[002]$. Плоскостям же (001) соответствуют $\mathbf{b}=[200]$, $[020]$ либо $[110]$.

Таким образом, направлению $[-112]$ соответствует наибольшее значение $b=\sqrt{6}$ (в единицах $a/\sqrt{2}$). Заметим также, что распространение по плоскостям $\{110\}$ соответствует неравенству $h > \ell$, и, следовательно, остроугольному сложению краевых (по отношению к Λ) компонент векторов \mathbf{b}_1 и \mathbf{b}_2 . Значит (при прочих равных условиях), именно максимизация переносимых «порций» b (а не соображения об устойчивости кристонов при тупоугольном сложении краевых компонент векторов \mathbf{b}_1 и \mathbf{b}_2) обеспечивает максимальный вклад в скорость деформации при прокатке, приводя к выделению компоненты текстуры прокатки $\{110\}\langle 11-2 \rangle$ в качестве главной.

Кристонная схема описания типичных компонентов текстуры прокатки в кристаллах с ОЦК-решеткой

Согласно [1], типичными компонентами текстуры прокатки, наблюдаемыми, например, в низкоуглеродистой стали, также являются варианты $\{hh\ell\}\langle \ell\ell-2h \rangle$. В первом и втором столбцах табл.1 приведены данные, взятые из табл.3.3 [1].

В третьем столбце приведены пары исходных систем скольжения для контактно взаимодействующих дислокаций, формирующих ОИФР. В четвертом столбце приведены линии пересечения Λ соответствующих пар плоскостей. Векторы Бюргерса (в единицах $a\sqrt{3}/2$) соответствуют направлениям диагоналей куба $\langle 111 \rangle$. Соответствия между индексами h и ℓ , задающими плоскости скольжения кристонов, и отношениями n/m , приведенными в пятом столбце табл.1, устанавливаются с помощью алгоритма, изложенного в предыдущем пункте на примере кристаллов с ГЦК решеткой.

Таблица 1. Текстурные компоненты в прокатанных ОЦК металлах

Table 1. Textural components in rolled BCC metals

{hkℓ}	<uvw>	Системы скольжения	Λ	n/m
001	110	(112) [11-1] (11-2) [111]	1-10	1/1
211	01-1	(101) [-111] (1-10) [111]	11-1	1/1
111	10-1	(123) [11-1] (321) [-111]	1-2 1	1/-1
111	11-2	(112) [11-1] (11-2) [111]	1-10	3/-1
11,11,8	4,4,-11	(112) [11-1] (11-2) [111]	1-10	-7/15
110	1-10	(100) [010] (010) [100]	001	1/1

Прокомментируем данные табл.1.

1. Все исходные системы дислокационного скольжения $\{110\}\langle 111\rangle$, $\{112\}\langle 111\rangle$, $\{113\}\langle 111\rangle$ участвуют в образовании компонентов текстуры, что подтверждает их примерное равноправие в процессе прокатки.

2. Компонента $\{110\}\langle 1-10\rangle$ (см. последнюю строку табл.1) соответствует взаимодействию не исходных, а кубических систем скольжения $\{010\}\langle 100\rangle$, которые, в свою очередь, возникают при взаимодействии кристонов $\{001\}\langle 110\rangle$ (см. первую строку табл.1) с чисто винтовыми (по отношению к Λ) дислокациями с векторами Бюргерса коллинеарными $\langle 1-10\rangle$.

3. Наличие компоненты текстуры $\{11\ 11\ 8\}\langle 4\ 4\ -11\rangle$ демонстрирует, что реальные суперпозиции векторов Бюргерса могут соответствовать десяткам исходных дислокаций в составе ОИФР.

4. Как отмечается в [1], при увеличении продолжительности прокатки возрастает доля компонент $\{112\}\langle 110\rangle$ и $\{111\}\langle 110\rangle$. Согласно данным табл.1, этим компонентам, так же, как и в случае ГЦК кристаллов, отвечает вариант равенства вкладов в формирование текстурных компонент от дислокаций, принадлежащих пересекающимся плоскостям скольжения.

Обсуждение результатов

Прежде всего, отметим, что направления сдвига $\langle \ell\ell-2h\rangle$ по плоскостям скольжения $\{hh\ \ell\}$ ортогональны направлениям Λ, задающим ориентацию сегмента ОИФР. Значит, при генерации кристонов следует ожидать возникновения петель супердислокаций с быстро распространяющимися сегментами, для которых

вектор **b** имеет краевую ориентацию по отношению к Λ. Напомним, именно краевые дислокации могут быстро перемещаться при скольжении по плоскостям, в которых лежат векторы Бюргерса. Для чисто винтовых дислокаций такой процесс невозможен. Следовательно, типичные наблюдаемые наборы текстур прокатки соответствуют вариантам быстрой релаксации напряжений, создаваемых внешней нагрузкой. Данный вывод можно рассматривать и как следствие принципа Циглера [7, 8], согласно которому в открытой неравновесной системе, далекой от состояния равновесия, процессы протекают с максимумом производства энтропии. Во избежание недоразумений отметим, что теорема Пригожина [9] о минимуме производства энтропии справедлива лишь для состояний систем вблизи теплового равновесия.

В случае, когда ядро кристона имеет конфигурацию, обеспечивающую деформацию сдвига, направление Λ будет совпадать с ориентацией оси поворота решетки внутри полосы сдвига. Вполне закономерно, что при прокатке возникают полосы сдвига. В частности, в [10] показано, что анализ текстуры образца после прокатки, как и ее изменение при формировании полос Чернова-Людерса [11], адекватно интерпретируются в кристонной модели. Заметим, в частности, что в [11] после прокатки мелкозернистой стали идентифицированы текстуры (332)[02-3] и (332)[1-33], плоскость которых близка (11 11 8), приведенной в табл. 1. Анализ в [10] показал, что направления [02-3] и [1-33] строго соответствуют добавлениям винтовых (по отношению к Λ \parallel [1-10]) составляющих к краевой компоненте [11-3] суперпозиционного вектора Бюргерса (очевидно, что ориен-

тация этой компоненты близка к [44-11], указанной в табл.1). Разумеется, этот результат согласуется с выводом (4) об аддитивной неоднозначности вектора Бюргера при определении плоскости скольжения кристона.

Образование текстуры в ходе деформации прокатки (плоская деформация типа растяжение-сжатие) вносит частичное упорядочение в ориентации кристаллических решеток поликристаллов (зерен), находившихся первоначально в разориентированном состоянии, при котором макроскопически образец ведет себя как изотропная среда. Хорошо известно, что появление текстуры сразу приводит к анизотропии свойств. Представляет интерес установление степени возможной корреляции между ориентациями границ полос сдвига, как и осей вращения решетки в зернах с первоначальной хаотической ориентацией, с ориентациями макроскопических инвариантных плоскостей и ориентацией оси вращения, задаваемых внешней плоской деформацией. В пользу такой корреляции свидетельствует существование полос сдвига, пронизывающих несколько зерен [1].

Заключение

1. Кристонная модель, базирующаяся на представлении о сильном (контактном) взаимодействии дислокаций, принадлежащих системам скольжения с пересекающимися плоскостями скольжения, позволяет предложить достаточно простую и наглядную схему описания процесса формирования текстур прокатки в металлах и сплавах как с ГЦК, так и ОЦК кристаллическими решетками.

2. Анализ показывает, что типичные наблюдаемые варианты прокатки удовлетворяют, в соответствие с принципом Циглера, условию быстрой релаксации напряжений, создаваемых внешней нагрузкой.

Список литературы

1. Humphreys F.J., Hatherly M. Recrystallization and related annealing phenomena. Second edition. Oxford, UK: ELSEVIER Ltd., 2004. P. 605.
2. Сильникова Е.Ф., Сильников М.В. Кристаллографическая текстура и текстурообразование. СПб.: Наука, 2011. 554 с.
3. Кащенко М.П., Летучев В.В., Теплякова Л.А., Яблонская Т.Н. Модель формирования макрополос сдвига и мартенсита деформации с границами (hhl) // ФММ. 1996. Т. 82, № 4. С. 10–21.
4. Кащенко М.П., Чащина В.Г., Семеновых А.Г. Кристонная модель формирования полос

сдвига в кубических кристаллах с кристаллографической ориентировкой общего типа // Физическая мезомеханика. 2003. Т. 6, № 1. С. 95–122.

5. Кащенко М.П., Чащина В.Г., Семеновых А.Г. Кристонная модель формирования α -мартенсита деформации в сплавах на основе железа // Физическая мезомеханика. 2003. Т. 6, № 3. С. 37–56.

6. Kashchenko M.P., Chashchina V.G. Crystons: basic ideas and applications // Letters on materials. 2015. V. 5, N 1. P. 82–89.

7. Циглер Г. Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механика сплошной среды/ пер. с англ. – М.: Мир. 1966. – 136 с.

8. Мартюшев Л.М., Селезнев В.Д. Принцип максимальности производства энтропии в физике и смежных областях. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. 83 с.

9. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. Введение/ пер. с англ. М.: Мир, 1990. 334 с.

10. Кащенко М.П., Семеновых А.Г., Нефедов А.В., Кащенко Н.М., Чащина В.Г. Роль кристонных источников сдвига в формировании полос Чернова-Людерса // Вычислительная механика сплошных сред. 2021. Т. 14, № 2. С. 203–209.

11. Фарбер В.М., Морозова А.Н., Хотин В.А., Карабаналов М.С., Щапов Г.В. Пластическое течение в полосе Чернова-Людерса в ультрамелкозернистой стали 08Г2Б // Физическая мезомеханика. 2019. Т. 22, №4. С. 75–82.

Информация об авторах

М. П. Кащенко – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой общей физики Уральского государственного лесотехнического университета; профессор кафедры высшей математики Института фундаментального образования Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина.

Н. А. Скорикова – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики Уральского государственного лесотехнического университета.

А. Г. Семеновых – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики Уральского государственного лесотехнического университета.

А. В. Нефедов – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей

физики Уральского государственного лесотехнического университета.

Н. М. Кащенко – студент Физико-технологического института Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина.

В. Г. Чащина – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики Института фундаментального образования Уральского федерального университета, профессор кафедры общей физики Уральского государственного лесотехнического университета.

References

1. Humphreys, F. J. & Hatherly, M. (2004). Recrystallization and related annealing phenomena. Second edition. Oxford, UK: ELSEVIER Ltd. P. 605. (In Russ.).

2. Silnikova, E. F. & Silnikov, M. V. (2011). Crystallographic texture and texture formation. Nauka, St. Petersburg. P. 554. (In Russ.).

3. Kashchenko, M. P., Letuchev, V. V., Teplyakova, L. A. & Yablonskaya, T. N. (1996). Model of formation of shear microstrips and deformation martensite with boundaries (hhl). *Phys. Met. Metallogr.*, 4(82), 10–21. (In Russ.).

4. Kashchenko, M. P., Chashchina, V. G. & Semenovkykh, A. G. (2003). A crystal model of the formation of shear bands in cubic crystals with a general type of crystallographic orientation. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 1(6), 95–122. (In Russ.).

5. Kashchenko, M. P., Chashchina, V. G. & Semenovkykh, A. G. (2003). Crystal model of the formation of α' -martensite deformation in iron-based alloys. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 3(6), 37–56. (In Russ.).

6. Kashchenko, M. P. & Chashchina, V. G. (2015). Crystons: basic ideas and applications. *Letters on materials*, 1(5), 82–89.

7. Ziegler, H. (1963). Some extremum principles in irreversible thermodynamics, with application to continuum mechanics. *Progress in Solid Mechanics*, (4), 93–193. (In Russ.).

8. Martyushev, L. M. & Seleznev, V. D. (2006). The principle of maximum entropy production in physics and related fields. Yekaterinburg: USTU-UPI. P. 83. (In Russ.).

9. Nicolis, G. & Prigogine, I. (1989). Exploring Complexity: An Introduction. W.H. Freeman. P. 313. (In Russ.).

10. Kashchenko, M. P., Semenovkykh, A. G., Nefedov, A. V., Kashchenko, N. M. & Chashchina, V.G. (2021). The role of crystal shear sources in the formation of Chernov-Luders bands. *Computational mechanics of continuous media*, 2(14), 203–209. (In Russ.).

11. Farber, V. M., Morozova, A. N., Khotinov, V. A., Karabanalov, M. S. & Shchapov, G. V. (2019). Plastic flow in the Chernov-Luders band in ultrafine-grained steel 08G2B. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 4(22), 75–82.

Information about the authors

M. P. Kashchenko – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Physics of the Ural State Forestry University; Professor of the Department of Higher Mathematics of the Ural Federal University.

N. A. Skorikova – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of the Department of Physics of the Ural State Forestry University.

A. G. Semenovkykh – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of the Department of Physics of the Ural State Forestry University.

A. V. Nefedov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of the Department of Physics of the Ural State Forestry University.

N. M. Kashchenko – Student at the Physics and Technology Institute of the Ural Federal University, Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics.

V. G. Chashchina – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Higher Mathematics of the Ural Federal University; Professor of the Department of Physics of the Ural State Forestry University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 27.04.2022; одобрена после рецензирования 10.05.2022; принята к публикации 17.05.2022.

The article was received by the editorial board on 27 Apr. 22; approved after reviewing on 10 May. 22; accepted for publication on 17 May. 22.