

РАЗДЕЛ 1. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 536.424.1

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.001

О РОЛИ ДЕФОРМАЦИИ ПИТЧА ПРИ $\gamma - \alpha$ МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ

Михаил Петрович Кашенко^{1†}, Анна Геннадьевна Семеновых²,
Алексей Викторович Нефедов³, Надежда Михайловна Кашенко⁴, Вера Геннадиевна Чашина⁵

^{1, 4, 5} Уральский федеральный университет им. Первого Президента России Б. Н. Ельцина, ул. Мира, 2, 620002, Екатеринбург, Россия

^{1, 2, 3, 5} Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт 37, 620100, Екатеринбург, Россия

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

² semenovyhag@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3467-1833>

³ a.nefedov@live.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1526-9163>

⁴ nad.kashenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2362-5567>

⁵ vera.chashina.77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7480-2562>

Аннотация. Ориентационные соотношения (ОС) относятся к совокупности однозначно связанных морфологических признаков, указывающих на кооперативный характер мартенситного превращения (МП). ОС демонстрируют параллельность (или близкую к таковой) соответственных плоскостей фаз и лежащих в плоскостях направлений. При $\gamma - \alpha$ МП в сплавах на основе железа для сравнительно крупных кристаллов мартенсита наблюдаются ОС Гренингера-Трояно (Г-Т), близкие с идеализированными соотношениями Курдюмова-Закса (К-З) и Нишиямы (Н). Подробно рассмотрен вопрос о возможной роли ОС Питча, зафиксированных в тонких фольгах. В рамках кристаллогеометрического анализа показано, что оснований для выбора деформации Питча в качестве предпочтительной по отношению к традиционным вариантам (бейновская деформация с последующими вращениями) не имеется, так как эта деформация приводит к большому относительному изменению объема при МП. Полярное разложение тензора дисторсии Питча демонстрирует, что деформации растяжения превышают бейновские, являясь причиной высокого значения объемного эффекта. Сделан качественный вывод о возможной реализации ОС Питча для нанокристаллов, возникающих в сильно искаженном остаточном аустените между относительно крупными кристаллами с ОС Г-Т. Отмечается целесообразность подтверждения образования нанокристаллов в динамической теории МП.

Ключевые слова: мартенситные превращения, ориентационные соотношения, деформация Питча, полярное разложение тензора, нанокристаллы мартенсита.

Благодарности: Авторы признательны участникам XXII Зимней школы по механике сплошных сред за обсуждение части результатов работы. 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., Семеновых А.Г., Нефедов А.В., Кашенко Н.М., Чашина В.Г. О роли ориентационных соотношений Питча при $\gamma - \alpha$ мартенситных превращениях // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 1. С. 9–16. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.001.

Original article

ON THE ROLE OF PITCH DEFORMATION DURING $\gamma - \alpha$ MARTENSITIC TRANSFORMATIONSMikhail P. Kashchenko^{1†}, Anna G. Semenovych², Alexey V. Nefedov³, Nadezhda M. Kashchenko⁴, Vera G. Chashchina⁵^{1, 4, 5} Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Mira Str., 19, Yekaterinburg, 620002, Russia^{1, 2, 3, 5} Ural State Forest Engineering University, Sybirskiy Tract Str., 37, Yekaterinburg, 620100, Russia¹ mpk46@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-2611-2858>² semenovychag@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3467-1833>³ a.nefedov@live.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1526-9163>⁴ nad.kashchenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2362-5567>⁵ vera.chashchina.77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7480-2562>

Abstract. Orientational relations (OR) refer to a set of uniquely related morphological features indicating the cooperative nature of the martensitic transformation (MT). ORs demonstrate parallelism (or close to that) of the corresponding phase planes and directions lying in the planes. For $\gamma - \alpha$ MP in iron-based alloys with relatively large crystals of martensite, Groeninger-Troyano (GT) ORs are observed, which are close to the idealized Kurdjumov-Zaks (K-Z) and Nishiyama (N) ratios. The question of the possible role of Pitch ORs fixed in thin foils is considered in detail. Within the framework of crystal geometric analysis, it was shown that there are no grounds for choosing the Pitch deformation as preferable in relation to the traditional variants (Bain deformation with subsequent rotations), since this deformation leads to a large relative change in volume under MT. The polar decomposition of the Pitch distortion tensor demonstrates that tensile deformations exceed Bain's, causing high values of the volumetric effect. A qualitative conclusion has been made about the possible realization of Pitch OR for nanocrystals arising in strongly distorted retained austenite between relatively large crystals with OR G-T. The expediency of confirming the formation of nanocrystals in the dynamic theory of magnetic fields is noted.

Keywords: martensitic transformations, orientation relations, Pitch deformation, polar decomposition of the tensor, martensite nanocrystals.

Acknowledgements: The authors are grateful to the participants of the XXII Winter School on Continuum Mechanics for a discussion of some of the results of this work. 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., Semenovych, A. G., Nefedov, A. V., Kashchenko, N. M. & Chashchina, V. G. (2022). On the role of Pitch's orientation relations in $\gamma - \alpha$ martensitic transformations. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 1(19), 9–16. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.001.

Введение

Мартенситные превращения (МП) в кристаллических телах (преимущественно в металлах и сплавах) протекают кооперативным путем и обладают признаками фазовых переходов I рода (температурный гистерезис, тепловой и объемный эффекты) [1]. При металловедческом анализе «визитной карточкой» МП выступают морфологические признаки: габитус, ориентационные соотношения (ОС) и макросдвиг. Они однозначно связаны между собой, что указывает на существование единого механизма управления.

В рамках кристаллографического подхода [2] ставилась (и до определенной степени решалась) задача описания морфологических признаков. Несмотря на заведомую ограниченность такого описания, предпринимаются попытки его использования в надежде получить дополнительные аргументы в пользу предпочтительности реализации каких-то деформационных схем.

Одна из таких попыток была предпринята Кайроном [3], допустившим, что предпочтение следует отдать схеме, ведущей к ОС Питча, наблюдавшимся в тонких железо-никелевых фольгах [4].

Полезно напомнить, что ОС демонстрируют параллельность (или близкую к таковой) соответственных плоскостей фаз и лежащих в плоскостях направлений. Так, на рис.1 и 2, при-

веденных в [1] и [5], показано, что при задании ориентаций плоскостей и направлений в базе исходной фазы, можно ожидать соответствия с ориентациями в базе другой фазы.

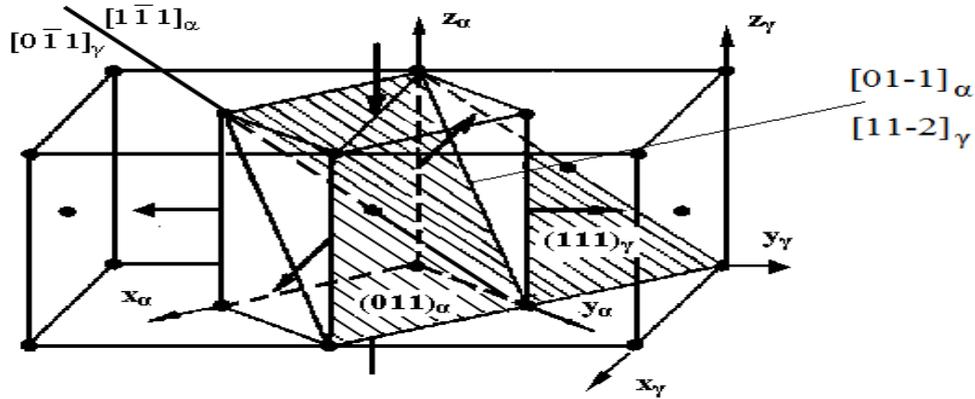


Рис.1. Кристаллографическое соответствие при деформации Бейна (ГЦК-ОЦК превращение)

Fig.1. Crystallographic correspondence with Bane deformation (fcc-bcc transformation)

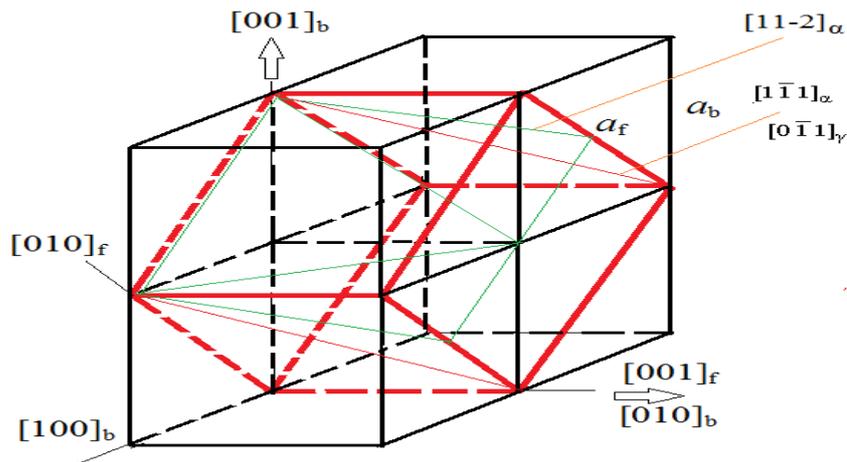


Рис.2. Выбор ячейки для иллюстрации деформации Бейна (при обратном ОЦК – ГЦК превращении), (подстрочные индексы b и f эквивалентны α и γ)

Fig.2. Selecting a cell to illustrate the Bane deformation (in the reverse bcc – fcc transformation), (subscripts b and f are equivalent to α and γ)

Межфазные ориентационные соотношения (ОС)

Для $\gamma - \alpha$ МП в сплавах на основе железа [1] наблюдаются ОС близкие (но несовпадающие) с идеализированными соотношениями Курдюмова-Закса (КЗ) и Нишиямы (Н):

$$\text{КЗ: } (111)_\gamma // (110)_\alpha, [\bar{1}10]_\gamma // [\bar{1}11]_\alpha, \quad (1)$$

$$\text{Н: } (111)_\gamma // (110)_\alpha, [11\bar{2}]_\gamma // [\bar{1}10]_\alpha. \quad (2)$$

В тонких фольгах иногда наблюдаются [4] ОС Питча (П):

$$\text{П: } [110]_\gamma // [111]_\alpha, [\bar{1}10]_\gamma // [11\bar{2}]_\alpha, [001]_\gamma // [\bar{1}10]_\alpha. \quad (3)$$

Из рис.1 в базе ГЦК решетки очевидны соответствия для ОС Курдюмова-Закса и Нишиямы. В записи (3) геометрические соответствия для ОС Питча менее очевидны.

Тем не менее, в работе [3] предполагалось, на основе представления о деформации с инвариантной линией [6-8], что именно деформация, ведущая к ОС Питча, является предпочтительной по сравнению с деформацией Бейна. В качестве такой линии выбиралась диагональ грани исходной ГЦК фазы и считалось, что она строго переходит в пространственную диагональ ОЦК фазы:

$$\sqrt{2} a_\gamma = \sqrt{3} a_\alpha,$$

где a_γ и a_α – параметры решетки γ и α фаз. Сам автор указывает на наблюдаемое отличие этих диагоналей приблизительно на 2 %, но считает, что этим отличием можно пренебречь, полагая, что используемая одношаговая схема превращения имеет явное преимущество по сравнению с двухсдвиговыми вариантами. Хотя, в дальнейшем Кайрон понял несостоятельность предположения, но акцентировать на этом внимание не стал. В результате у части исследователей может сложиться впечатление о сохранении ведущей роли ОС Питча. В данной работе, носящей в значительной степени методический характер, дается сопоставление деформаций Питча и Бейна и отмечается возможность появления ОС Питча в качестве спутных по отношению к ОС, типичным для первых поколений кристаллов.

Полярное разложение тензора дисторсии Питча

Для удобства читателей напомним кратко данные [3] о тензоре \hat{D} , равном сумме единичного тензора \hat{I} и тензора дисторсии Питча $\hat{\chi}$, которому сопоставляется матрица

$$D = \begin{bmatrix} (1+\sqrt{2})/3 & (2-\sqrt{2})/3 & 0 \\ (1-\sqrt{2})/3 & (2+\sqrt{2})/3 & 0 \\ 0 & 0 & 2/\sqrt{3} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Нетрудно убедиться, что собственным числам тензора:

$$d_1 = 1, d_2 = \sqrt{8}/3 \approx 0,943, d_3 = 2/\sqrt{3} \approx 1.155, \quad (5)$$

соответствуют собственные векторы

$$\begin{aligned} \bar{\xi}_1 &= [1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2}, 0]_\gamma, & \bar{\xi}_2 &= [\sqrt{2/3}, \sqrt{1/3}, 0]_\gamma, \\ \bar{\xi}_3 &= [001]_\gamma. \end{aligned} \quad (6)$$

Заметим, что векторы $\bar{\xi}_1$ и $\bar{\xi}_2$ – нормированы, но не ортогональны друг к другу, поскольку тензор D несимметричен. Отношение удельных объемов фаз задается детерминантом тензора

$$\det D = 2(3/2)^{-3/2} = [(a_\alpha)^3/2]/[(a_\gamma)^3/4] \approx 1,088662. \quad (7)$$

Из (7) следует, что относительное изменение объема велико

$$\delta = \det D - 1 \approx 0,088662. \quad (8)$$

Таким образом, по объемному эффекту деформация Бейна (с типичным значением $\delta_B \approx 2\%$)

явно выигрывает у деформации Питча ($\delta_{\text{П}} \approx 9\%$).

При деформации с инвариантной плоскостью деформация Бейна сопровождается последующим поворотом, близким к 10° . Чтобы проверить, какова величина поворота, сопоставляемая деформации Питча, удобно провести полярное разложение тензора \hat{D} :

$$\hat{D} = \hat{O} \hat{\Lambda}. \quad (9)$$

В (9) \hat{O} – ортогональный тензор, соответствующий интересующему нас повороту, $\hat{\Lambda}$ – положительно определенный симметричный тензор:

$$\hat{\Lambda} = (\hat{D}^* \hat{D})^{1/2}, \quad (10)$$

где \hat{D}^* – сопряженный (с транспонированной матрицей) тензор. Из (9) очевидно, что

$$\hat{O} = \hat{D} \hat{\Lambda}^{-1}. \quad (11)$$

Чтобы найти $\hat{\Lambda}^{-1}$, необходимо найти вначале собственные числа λ_i тензора $\hat{\Lambda}$. Тогда будет соответствовать диагональная матрица с элементами λ_i^{-1} . В свою очередь, λ_i находятся извлечением корня из собственных чисел \tilde{d}_i тензора D^*D . Нетрудно показать, что

$$\tilde{d}_1 = \tilde{d}_3 = 4/3, \tilde{d}_2 = 2/3,$$

$$\lambda_1 = \lambda_3 = \sqrt{\tilde{d}_1} = 2/\sqrt{3}, \lambda_2 = \sqrt{2/3}. \quad (12)$$

В качестве проверки отметим, что относительное изменение объема соответствует найденному ранее (8)

$$\Delta = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 - 1 = \frac{4}{3} \sqrt{2/3} - 1 \approx 0,08866 \rightarrow 8,87\%. \quad (13)$$

Для главных значений тензора деформаций имеем:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \lambda_1 - 1 = \frac{2}{\sqrt{3}} - 1 \approx 0,155,$$

$$\varepsilon_2 = \lambda_2 - 1 = \sqrt{2/3} - 1 \approx -0,183. \quad (14)$$

Зная λ_i , из (4) и (11) легко находим матричное представление тензор \hat{O} в виде

$$O = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

Что соответствует повороту вокруг $z \parallel [001]_\gamma$ на угол φ

$$|\varphi| = \arccos \frac{1 + \sqrt{2}}{\sqrt{6}} \approx 9,74^\circ. \quad (16)$$

Сравнение деформации Питча и деформации с инвариантной плоскостью

Собственные векторы тензора Λ совпадают с ребрами элементарной кубической ячейки аустенита $\langle 001 \rangle_\gamma$. Характер деформации аналогичен бейновской (два одинаковых растяжения и сжатие в ортогональном направлении), но значения отличаются от типичных для α -мартенсита охлаждения в сплавах железа, поэтому деформационную часть тензора D мы условно назвали деформацией Питча.

Величины деформаций растяжения при деформации Питча $\varepsilon_{1П} = \varepsilon_{3П} \approx 0,155$ заметно превышают соответствующие бейновские ($\varepsilon_{1Б} \approx 0,131$), $\varepsilon_{1П}/\varepsilon_{1Б} \approx 1,183$. В результате, хотя модуль деформации сжатия меньше ($\varepsilon_{2П}/\varepsilon_{2Б} \approx 0,184/0,2=0,92$), увеличение удельного объема при деформации Питча почти в 4 раза больше:

$$\delta_{П}/\delta_{Б} \approx 0,0887/0,024 \approx 3,7.$$

Угол поворота $\varphi_{П} \approx 9,7^\circ$ при ОС Питча близок к значениям основного поворота (вокруг одной из осей $\langle 110 \rangle$), приводящего к ОС Нишиямы. Для получения другого идеального ОС К-3 требуется дополнительный поворот (примерно на 5°) вокруг одной из осей $\langle 111 \rangle_\gamma$ [2]. Для реально наблюдаемого [10] ОС Гренингера-Трояно (ОС Г-Т) дополнительный поворот составляет $2-3^\circ$.

Таким образом, сравнение с кристаллогеометрическими схемами перестройки решетки не позволяет отдать предпочтение деформации Питча.

Обсуждение результатов

Позднее полярное разложение (см., например, [9]), было выполнено, но значимых физических аргументов в пользу выделенности каких-либо ОС не приведено.

Это связано с тем, что фактически анализ [3, 9] проводился в русле формального кристаллогеометрического подхода [2, 6-8], не учитывающего ни стадию зародышеобразования, ни физическую реализацию быстрого (волнового) механизма управления ростом кристалла мартенсита. Достаточно полную картину формирования кристалла мартенсита дает динамическая теория [11-13]. Показано, что традиционно фиксируемые ОС, как и остальные морфологические признаки, находятся в хорошем соответствии с картиной наследования

волновым процессом, управляющим ростом кристалла, характера деформации аустенита в области старта МП. Причем наследуемая деформация непосредственно связана с упругими полями дислокаций, типичных для исходной фазы. Заметим, в динамической теории МП показано, что сдвиговая деформация является естественным следствием наложения продольных (или квазипродольных) деформаций. Поэтому нет необходимости интерпретации макросдвига как следствия распространения поперечных (сдвиговых) волн.

Большой объемный эффект предопределяет неконкурентоспособность деформации Питча по сравнению с вариантами перестройки, обладающими меньшими значениями δ . В первую очередь, это утверждение относится к образованию кристаллов мартенсита первого поколения в объемах достаточно крупных зерен, когда толщины кристаллов имеют порядок 1 мкм. В связи с этим понятно, почему ОС Питча наблюдались в тонких фольгах, большая свободная поверхность которых не препятствует увеличению объема. С большой вероятностью можно утверждать, что появление ОС Питча при МП в крупных зернах аустенита связано с нанокристалликами мартенсита в областях между относительно крупными кристаллами первых поколений, обладающих традиционными ОС Гренингера-Трояно. Как обсуждалось в [14], аккомодационный «резерв» решетки допускает возникновение нанокристаллов.

На рис.3 приведена одна из упрощенных качественных схем расположения кристаллов мартенсита с ОС Питча. Стрелки указывают направления расширения кристаллов мартенсита при положительном объемном эффекте. Крупные кристаллы имеют ОС Г-Т.

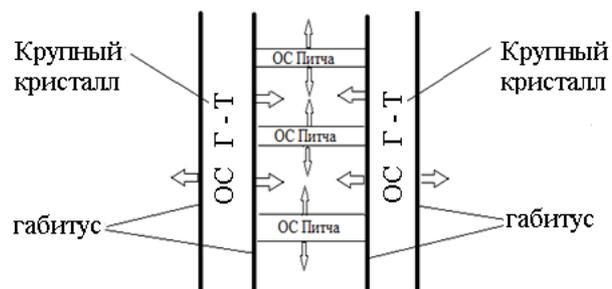


Рис.3. Качественная схема возможной локализации кристалликов с ОС Питча

Fig.3. Qualitative scheme of possible localization of crystals with Pitch OR

Отметим, что формирование нанокристаллов с высоким удельным объемом в области сильно искаженного релаксационными процессами остаточного аустенита должно вызывать затруднения с выявлением таких признаков как габитусная плоскость и макросдвиг. Поэтому определение ориентационных соотношений выступает на первый план.

Не исключено, что ОС, близкие к ОС Питча, возникают без выраженных габитусов мартенситных кристаллов за счет сильного искажения решетки остаточного аустенита между мартенситными кристаллами при преимущественном сжатии аустенита, обусловленном положительным объемным эффектом. Тогда обсуждаемые ОС лишь предположительно связаны с мартенситным превращением, гипотетически допускаемым при интерпретации картин разориентировок, получивших естественное широкое распространение после создания аппаратуры, базирующейся на расшифровке ориентаций с помощью эффекта обратного рассеяния электронов.

Заметим также, что отсутствие привычной морфологии с выделенным явно габитусом, может быть следствием формирования стержневидных кристаллов мартенсита [15].

Заключение

1. Проведенный анализ показывает, что дисторсия Питча и связанные с ней ориентационные соотношения не играют ведущей роли при $\gamma - \alpha$ мартенситном превращении, хотя и могут проявиться при формировании наномасштабных кристаллов между крупными кристаллами мартенсита первых поколений.

2. Представляет интерес подтверждение качественного вывода о нанокристалличности мартенсита, обладающего повышенными значениями деформации растяжения и, как следствие, повышенным удельным объемом, динамической теорией МП с описанием трехмерной пороговой деформации. Этому вопросу будет посвящена отдельная работа.

Список литературы

1. Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. М.: Наука, 1977. 238 с.
2. Wechsler M.S., Lieberman D.S., Read T.A. On the theory of the formation of martensite // *Journal of Metals*. 1953. P. 1503–1515.
3. Cayron C. One-step theory of fcc-bcc martensitic transformation // *Acta Cryst.* 2013. A69. P. 498–509.
4. Pitsch W. The martensite transformation in thin foils of iron-nitrogen alloys // *Phil. Mag.* 1959. N 4. P. 577–584.
5. Варлимонт Х., Дилей Л. Мартенситные превращения в сплавах на основе меди, серебра и золота. М.: Наука, 1980. 205 с.
6. Bowles J.S., Mackenzie J.K. The crystallography of martensite transformations I // *Acta Metallurgica*. 1954. V. 2, N 1. P. 129–137.
7. Bowles J.S., Mackenzie J.K. The crystallography of martensite transformations II // *Acta Metallurgica*. 1954. V. 2, N 1. P. 138–147.
8. Bowles J.S., Mackenzie J.K. The crystallography of martensite transformations III. Face-centered cubic to body-centered tetragonal transformations // *Acta Metallurgica*. 1954. V. 2, N 3. P. 224–234.
9. Cayron C. Continuous atomic displacements and lattice distortion during fcc-bcc martensitic transformation // *Acta Mater.* 2015. V. 96. P. 189–202.
10. Greninger A.B., Troiano A.R. The mechanism of martensite formation // *Metal. Trans.* 1949. V. 185. P. 590–598.
11. Кащенко М.П., Чащина В.Г. Основные принципы динамической теории реконструктивных мартенситных превращений // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2006. Т. 3, № 4. С. 67–70.
12. Кащенко М.П., Чащина В.Г. Динамическая модель сверхзвукового роста мартенситных кристаллов // *УФН*. 2011. Т. 181, № 4. С. 345–364.
13. Кащенко М.П., Чащина В.Г. Динамическая модель формирования двойникованных мартенситных кристаллов при $\gamma - \alpha$ превращениях в сплавах железа. Екатеринбург: УГЛТУ, 2009. 98 с.
14. Кащенко М.П., Чащина В.Г. Аккомодационное мартенситное превращение в нанокристаллическом состоянии // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2008. Т. 5, № 2. С. 40–44.
15. Кащенко М.П., Чащина В.Г. Перспективные варианты инициации роста стержневидных кристаллов α -мартенсита в сплавах железа тремя источниками упругих волн // *Материаловедение и термическая обработка металлов*. 2016. № 5. С. 9–13.

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.

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

А. В. Неведов – кандидат физико-математических наук, доцент кафедрой 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. Kurdyumov, G. V., Utevskii, L. M. & Entin, R. I. (1977). Transformations in Iron and Steel. Nauka, Moscow. P. 238. (In Russ.).
2. Wechsler, M. S., Lieberman, D. S. & Read, T. A. 1953. On the theory of the formation of martensite. *Journal of Metals*, 1503–1515.
3. Cayron, C. (2013). One-step theory of fcc-bcc martensitic transformation. *Acta Cryst.*, (A69), 498–509.
4. Pitsch, W. (1959). The martensite transformation in thin foils of iron-nitrogen alloys. *Phil. Mag.*, 4, 577–584.
5. Warlimont, H. & Delay, L. (1980). Martensitic Transformations in Copper-, Silver- and Gold-Based Alloys. Nauka, Moscow. P. 205. (In Russ.).
6. Bowles, J. S. & Mackenzie, J. K. (1954). The crystallography of martensite transformations I. *Acta Metallurgica*, 1(2), 129–137.
7. Bowles, J. S. & Mackenzie, J. K. (1954). The crystallography of martensite transformations II. *Acta Metallurgica*, 2(1), 138–147.

8. Bowles, J. S. & Mackenzie, J. K. (1954). The crystallography of martensite transformations III. Face-centered cubic to body-centered tetragonal transformations. *Acta Metallurgica*, 3(2), 224–234.

9. Cayron, C. (2015). Continuous atomic displacements and lattice distortion during fcc-bcc martensitic transformation. *Acta Mater.*, (96), 189–202.

10. Greninger, A. B. & Troiano, A. R. (1949). The mechanism of martensite formation. *Metal. Trans.*, (185), 590–598.

11. Kashchenko, M. P. & Chashchina, V. G. (2006). Basic principles of the dynamic theory of reconstructive martensitic transformations. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 4(3), 67–70. (In Russ.).

12. Kashchenko, M. P. & Chashchina, V. G. (2011). Dynamic model of supersonic martensitic crystal growth. *Phys. Usp.*, (54), 331–349. (In Russ.).

13. Kashchenko, M. P. & Chashchina, V. G. (2012). Dynamic Theory of γ – α Transformation in Iron Based Alloys. Solving the Problem of the Formation of Twinned Martensite Crystals. Saarbrücken (Germany). Lambert Academic. P. 110. (In Russ.).

14. Kashchenko, M. P. & Chashchina, V. G. (2008). Accommodation martensitic transformation in the nanocrystalline state. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 2(5), 40–44 (In Russ.).

15. Kashchenko, M. P. & Chashchina, V. G. (2016). Promising variants of initiation of growth of rod-like crystals of α -martensite in iron alloys by three sources of elastic waves. *Metal Science and Heat Treatment of Metals*, 5, 9–13. (In Russ.).

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.

A. G. Semenovykh – 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 10.01.2022; одобрена после рецензирования 24.01.2022; принята к публикации 07.02.2022.

The article was received by the editorial board on 10 Jan. 22; approved after reviewing 24 Jan. 22; accepted for publication 07 Feb. 22.