

УДК 669.017:621.771:621.785.66-97

КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ СВЯЗИ ЦЕМЕНТИТ–АУСТЕНИТ–ФЕРРИТ ПРИ ДИФФУЗИОННОМ РАСПАДЕ АУСТЕНИТА

БОЛЬШАКОВ В. И.¹, д. т. н., проф.,СУХОМЛИН Г. Д.^{2*}, д. т. н., проф.,СУХОМЛИН В. И.^{3*}, с. н. с.

¹ Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепропетровск, 49005, Украина, тел. +38 (056) 745 23 72, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

^{2*} Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепропетровск, 49005, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-62, e-mail: g_suhomlin@mail.ru, ORCID ID: 000-0001-5840-169X

^{3*} Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепропетровск, 49005, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: alma31@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-3673-1353

Аннотация. Проведен поиск новых, более точных ориентационных соотношений между кристаллическими решётками в перлитных и бейнитных продуктах распада аустенита. **Методика.** Используются методы: трансмиссионной электронной микроскопии, микродифракции, математического матричного и стереографического анализов. **Цель исследования** – теоретическими, расчетными и экспериментальными методами установить с точностью до 0,2 углового градуса ориентационные соотношения между решётками феррита и цементита в продуктах распада аустенита в интервале температур 400...700°C. **Результаты.** Установлено новое, уточнённое соотношение решёток при диффузионном распаде $\gamma \rightarrow \alpha + (\alpha + \theta)$. **Практическая значимость.** Предложена новая ориентационная зависимость и соответствующая двойная гномостереографическая проекция с полюсами нормалей к плоскостям α и θ фаз, которая может быть использована при исследованиях закономерностей кристаллографических связей решёток при фазовых переходах, а также при последующем моделировании сложных физических процессов структурообразования в металлах и бинарных системах.

Ключевые слова: феррито-перлитные стали, распад аустенита, фазовые превращения, ориентационные соотношения, кристаллография перлита

КРИСТАЛОГРАФІЧНІ ЗВ'ЯЗКИ ЦЕМЕНТИТ–АУСТЕНИТ–ФЕРИТ ПРИ ДИФУЗІЙНОМУ РОЗПАДІ АУСТЕНИТУ

БОЛЬШАКОВ В. И.¹, д. т. н., проф.,СУХОМЛИН Г. Д.^{2*}, д. т. н., проф.,СУХОМЛИН В. И.^{3*}, с. н. с.

¹ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпропетровськ, 49005, Україна, тел. +38 (056) 745 23 72, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

^{2*} Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпропетровськ, 49005, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-62, e-mail: g_suhomlin@mail.ru, ORCID ID: 000-0001-5840-169X

^{3*} Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпропетровськ, 49005, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: alma31@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-3673-1353

Анотація. Проведено пошук нових, більш точних орієнтаційних співвідношень між кристалічними решітками в перлітних і бейнітних продуктах розпаду аустеніту. **Методика.** Використано методи: трансмісійної електронної мікроскопії, мікродифракції, математичного матричного і стереографічного аналізів. **Мета дослідження** - теоретичними, розрахунковими і експериментальними методами встановити з точністю до 0,2 кутового градуса орієнтаційні співвідношення між решітками фериту і цементиту в продуктах розпаду аустеніту в інтервалі температур 400...700°C. **Результати.** Встановлено нове, уточнене співвідношення решіток при дифузійному розпаді $\gamma \rightarrow \alpha + (\alpha + \theta)$. **Практична значимість.** Знайдені орієнтаційні співвідношення та побудована подвійна гномостереографічна проекція з полюсами нормалей до площин α і θ фаз, яка може бути використана при дослідженнях закономірностей кристаллографічних зв'язків решіток при фазових переходах, а також при наступному моделюванні складних фізичних процесів структуроутворення в металах та бінарних системах.

Ключові слова: феритно-перлітні сталі, розпад аустеніту, фазові перетворення, орієнтаційні співвідношення, кристаллографія перліту

CRYSTALLOGRAPHIC RELATIONS OF CEMENTITE–AUSTENITE– FERRITE IN THE DIFFUSIVE DECOMPOSITION OF AUSTENITE

BOL'SHAKOV V. I.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
SUKHOMLIN G. D.^{2*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
SUKHOMLIN V. I.^{3*}, *Senior researcher*

¹ Department of Material Science and Treatment of Materials, State Higher Educational Establishment «Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 745 23 72, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0790-6473

^{2*} Department of Material Science and Treatment of Materials, State Higher Educational Establishment «Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-02-62, e-mail: g_suhomlin@mail.ru, ORCID ID: 000-0001-5840-169X

^{3*} Department of Material Science and Treatment of Materials, State Higher Educational Establishment «Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: alma31@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-3673-1353.

Summary. It was made a search for new and more accurate orientation relations between the crystal lattice in the pearlite and bainite austenite decomposition products. **Methods.** It were used the methods: transmission electron microscopy, the micro-, mathematical matrix and stereographic analysis. **The purpose of the research** is with theoretical, numerical and experimental methods to set up to a 0.2 degree angular orientation relations between the lattices of ferrite and cementite in the austenite decomposition products in the temperature range 400 ... 700°C. **Results.** It was established a new, refined value for grids in the diffusion decay of $\gamma \rightarrow \alpha + (\alpha + \theta)$. **Practical significance.** It was proposed a new oriented dependence and the corresponding double gnomonic projection with poles to planes α and θ phases, which can be used in patterns of crystallographic lattices relations studies at phase transitions, as well as the subsequent modeling of complex physical processes of structure formation in metals and binary systems.

Keywords: *low-carbon steel, decomposition of austenite, phase transformations, oriented relations, pearlite crystallography*

Введение. Известно, что одним из основных путей разрушения поликристаллических материалов является распространение межкристаллитной трещины. При этом было показано, что склонность к межкристаллитному разрушению связана не только с химическим составом, микроструктурой материала и агрессивностью окружающей среды, но и с типом и структурой границ зерен. Строение границы определяет меру её дефектности по сравнению с бездефектной решёткой, т. е. удельную поверхностную энергию. Энергия границы играет доминирующую роль в её способности влиять на основные свойства поликристаллов, такие, как прочность, пластичность, адгезионную способность, коррозионную стойкость и многие другие [1]. В свою очередь, строение внутрифазной границы определяется взаимным поворотом решёток кристаллов друг относительно друга, а для межфазных границ — ещё и параметрами решёточных элементарных ячеек контактирующих кристаллов.

Современные представления об атомном строении большеугловых границ зёрен

основаны на концепции решёток совпадающих узлов (PCY), которая позволяет успешно рассчитывать удельную поверхностную энергию границ зёрен, если известны основные характеристики взаимной ориентации решёток (ось и угол поворота) и поэтому важно устанавливать ориентационные соотношения (ОС) с высокой точностью. Основные ОС между решётками фаз в металлах и сплавах были установлены ещё в прошлом столетии, с относительно низкой точностью (до 3...5 градусов, а иногда и хуже). Особенно важны ориентационные соотношения в системе железо-углерод, где существуют различные полиморфные переходы (аустенит, феррит, цементит) и выделяются более 5 типов карбидов с различными температурами зарождения и растворения. Например, известное соотношение $\gamma \rightarrow \alpha'$, реализующееся при сдвиговом превращении аустенита [2], имеет несколько вариантов, основные из которых отличаются на несколько градусов в пределах 5° [2–4]. А в сопряжениях между ферритом и цементитом в перлите и отпущенном мартенсите сложилась неопределенная ситуация. Еще в 1947 году в «Журнале технической физики»

была опубликована обстоятельная работа В. А. Исайчева [5], в которой описаны результаты экспериментального определения ориентационных соотношений аустенит-феррит, феррит-цементит и аустенит-цементит рентгеновским методом. Они были получены на одном монокристалле стали, который подвергали соответствующим обработкам, фиксируя рентгенограммы вращения и строя по ним стереографические проекции полюсов плоскостей феррита, аустенита и цементита (θ - карбида). К тому времени соотношение $\theta \rightarrow \gamma$ было установлено М.Э. Арбузовым и Г.В. Курдюмовым (ОС АК) [6], а соотношение аустенит-мартенсит — Г.В. Курдюмовым и Г. Заксом (ОС КЗ) [2] с использованием такой же методики. При этом, полученное И.В. Исайчевым $\alpha \rightarrow \theta$ соотношение (ОСИ) [5]:

$$(1\|\|03)_\theta \parallel (1\|\|01)\alpha; [010]_\theta \parallel [1\|\|11]\alpha \quad (1)$$

до настоящего времени не получило полного признания.

Спустя три года, в 1950 году С.А. Багаряцкий, коллега И.В. Исайчева, опубликовал в журнале «Доклады АН СССР» статью [7], в которой рассмотрены кристаллографическое строение и подобие элементарных ячеек α' и θ фаз и предложен вероятный механизм перестройки α' тетрагональной решётки мартенсита в орторомбическую решётку цементита. Сделан вывод, что при такой операции окажутся почти параллельными плоскости:

$$(001)_\theta \parallel (112)\alpha; (100)_\theta \parallel (1\|\|10)\alpha; (010)_\theta \parallel (1\|\|11)\alpha. \quad (2)$$

По неизвестным причинам это предположение было воспринято научной общественностью в качестве физически существующего (ОСБ), реализующегося при отпуске (выше 500°C) мартенсита [11], при перлитном распаде аустенита [8–9], в бейните (ниже 500°C) [10–11].

Такое положение дел сохраняется до настоящего времени, хотя в 60-70-ых годах появились публикации, о случаях реализации ОС Исайчева в перлитных структурах [11–12].

В работах В.И. Большакова с сотрудниками [13] были усовершенствованы методы обработки дифракционных данных, повышающие точность измерений азимутальных компонентов до 0,1 градуса. Это позволило на большом массиве микродифракционного материала (свыше 150 случаев сопряжений) показать [13], что подавляющее большинство (~81%) дифракционных картин от перлита и отпущенного мартенсита могут быть однозначно отнесены к ОС Исайчева, а 9% допускают двоякую трактовку из-за специфики формирования электрограмм и ограниченных возможностей гониометрических устройств. Важно акцентировать, что случаи, которые надёжно соответствовали бы ОС Багаряцкого [7], зафиксированы не были. Эти факты указывают на реализацию в естественных условиях сопряжений ферритных и цементитных кристаллов не по ОС Багаряцкого, а по ОС Исайчева.

В перлитных сталях на единицу объёма содержится особенно много межфазных границ феррит-цементит, однако трещины по α - θ границам образуются редко и лишь в тех случаях, когда направление течения металла случайно происходит почти вдоль пластин перлита. Вопрос о наследовании кристаллографических связей при диффузионных фазовых превращениях обсуждается довольно давно. Примерами могут служить работы Омори [9–10], Л. М. Утевского [11], Шеклтона и Келли [12], в которых для выяснения этого вопроса были применены матричные уравнения.

Очевидно, что дальнейшая работа в этом направлении актуальна и её следует продолжать.

Цель исследования — установить теоретическим, расчетным и экспериментальными методами с точностью до 0,2 углового градуса ориентационные соотношения между решётками аустенита, феррита и цементита в продуктах распада аустенита в интервале температур 400...700°C.

Материал и методики исследований.

Исследовали низкоуглеродистые ферритно-перлитные стали 20, Ст 3 и микролегированную сталь 10Г2ФБ. Применяли методы: трансмиссионной электронной микроскопии, микродифракции, математического матричного и стереографического анализ [11, 15, 16].

Результаты исследования и их обсуждение

Для работы с различными вариантами ориентационных соотношений удобно выражать их двумя методами. Первый из них — стереографический — не обеспечивает высокой точности ($\pm 2^\circ$), но позволяет наглядно представить общую картину расположения многих плоскостей или векторов между собой [11, 12, 15].

Гораздо больше информации позволяет получать и обрабатывать метод матриц [11, 16], точность которого может быть лучше 5 угловых минут. В сочетании с формулой косинусов это позволяет определять углы между рефлексами фаз с такой точностью, какая может быть достигнута в процессе наблюдения, юстирования и фиксации микродифракционных изображений [15].

Руководствуясь правилами, изложенными в [13, 16], были вычислены компоненты матриц наиболее распространенных ориентационных соотношений между фазами в сталях.

Один из шести кристаллографически равноценных вариантов ОС А-К можно записать следующим образом:

$$(100)_\alpha \parallel (545)_\gamma; \quad (010)_\alpha \parallel (101)_\gamma; \\ (001)_\alpha \parallel (2|52)_\gamma$$

Вводя коэффициенты, выравнивающие скалярные величины векторов, параллельных осевым направлениям [11, 16], получим матрицу ориентационного и размерного соответствия для ОС Арбузова-Курдюмова:

$$R_{A-K} = \begin{pmatrix} 0.48773 & 0.39018 & 0.48773 \\ -0.49825 & 0 & 0.49825 \\ -0.18514 & 0.46284 & -0.18514 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Аналогичным путём были получены матрицы ОС Курдюмова-Закса:

$$R_{K-3} = \begin{pmatrix} 0.59289 & 0.51953 & 0.13324 \\ -0.53300 & 0.59289 & 0.05989 \\ -0.05989 & -0.13324 & 0.7866 \end{pmatrix} \quad (4)$$

ОС Исайчева:

$$R_{И} = \begin{pmatrix} 0.03234 & -0.43098 & 0.4633 \\ 0.32526 & -0.32526 & -0.325 \\ 0.34646 & 0.1920210 & 0.1544 \end{pmatrix} \quad (5)$$

и ОС Питча [24], которое характерно для перлита:

$$R_{П} = \begin{pmatrix} 0.56618 & -0.21776 & 0.1829 \\ 0.14706 & 0.51895 & 0.1829 \\ -0.15524 & -0.07762 & 0.3881 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Используя матрицы, описывающие разные виды формоизменений различных решёток, можно строить механизмы (модели) последовательных стадий фазовых переходов. Такие методы матричного прогнозирования были применены в работах Омори [15], Шеклтона и Келли [17], Жанга и Келли [20] и были получены перспективные результаты.

В случае кристаллографических сопряжений при диффузионном распаде аустенита можно полагать [15], что зарождающиеся в контакте с аустенитной решёткой карбиды приобретают ориентацию в соответствии с ОС $\gamma \leftrightarrow \theta$ и впоследствии оказываются в окружении ферритных кристаллов, ориентация которых диктуется ОС $\gamma \leftrightarrow \alpha$. В итоге между карбидной и ферритной решётками формируется закономерное сопряжение, подчиняющееся известным связям. Результат может быть сопоставлен с экспериментальными данными или выводами других работ или со схемами, реализующимися при новых фазовых превращениях.

В нашем случае имеется матрица R_{A-K} ориентационного и размерного соответствия, вычисленная с высокой точностью в согласии с предложенной М. Э. Арбузовым и Г. В. Курдюмовым для перехода от индексов плоскостей цементита к индексам плоскостей аустенита (3), и матрица (4) перехода от аустенита к ферриту R_{K-3} по соотношению Курдюмова-Закса.

В итоге, соответствие между решётками цементита и феррита $\alpha \rightarrow \mathbf{R}_X \rightarrow \theta$ можно получить, умножая матрицу ОС А-К на матрицу ОС К-3:

$$[\theta \rightarrow \mathbf{R}_{AK} \rightarrow \gamma] \times [\gamma \rightarrow \mathbf{R}_{K3} \rightarrow \alpha] = [\alpha \rightarrow \mathbf{R}_X \rightarrow \theta]. \quad (7)$$

Здесь уместно отметить, что аустенитную решётку можно наложить на цементитную в соответствии с ОС АК только шестью вариантами (табл. 1):

Таблица 1

Варианты наложения аустенитной решетки на цементитную /
Variants of imposition of austenitic grate on a cementite one

Варианты	1	2	3	4	5	6
На ось [100]	(5-45)	(5-45)	(-455)	(455)	(554)	(5-54)
На ось [010]	(-101)	(101)	(011)	(011)	(110)	(110)
На ось [001]	(2-52)	(2-52)	(-522)	(-522)	(2-25)	(2-25)

При скалярном умножении шести вариантов матриц \mathbf{R}_{AK} , отвечающих таблице 1, на один вариант матрицы ОС КЗ, получены шесть вариантов матрицы \mathbf{R}_X , которые можно представить в виде трёх пар. В каждой паре элементы одинаковые, но отличаются перестановкой столбцов. Например,

$$\begin{pmatrix} 0.48773 & 0.39018 & 0.48773 \\ -0.49825 & 0 & 0.49825 \\ -0.18514 & 0.46284 & -0.18514 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.59289 & 0.51953 & 0.13324 \\ -0.53300 & 0.59289 & 0.05989 \\ -0.05989 & -0.13324 & 0.78603 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.05199 & 0.41974 & 0.47172 \\ -0.32525 & -0.32524 & 0.32525 \\ -0.34537 & 0.20290 & -0.14247 \end{pmatrix}$$

$$\text{Матрица ОСИ} \begin{pmatrix} 0.03234 & -0.43098 & 0.46331 \\ 0.32526 & -0.32526 & -0.32526 \\ 0.34646 & 0.19202 & 0.15444 \end{pmatrix}$$

Первые два варианта \mathbf{R}_X отличаются циклической перестановкой столбцов: первый стал вторым, второй – третьим, а третий – первым. Ниже этих двух вариантов \mathbf{R}_X приведена матрица ОСИ, сравнение с которой показывает, что эти варианты соответствуют матрицам ОС Исайчева с точностью до второго знака после запятой. Такие отклонения могут быть связаны с отклонениями ОС Курдюмова-Закса, что отмечается во многих работах [16-18].

Остальные две группы по два варианта значений \mathbf{R}_X в каждой отличаются друг от друга и от матрицы \mathbf{R}_H несколькими первыми знаками после запятой.

Что касается второго ОС в перлитных структурах – ОС Питча, то оно было установлено [17] без тщательного стереографи-

ческого и матричного анализов и его несовершенство общеизвестно. В работе Жанга и Келли [14] даже были предложены три альтернативные варианта ОС Питча:

$$\text{OR-1} \quad (1|03)_{ц} \parallel (1|01)_{ф} \\ [010]_{ц} \ 8,5 \square \square \text{от } [131]_{ф} \\ [311]_{ц} \parallel \square [111]_{ф}$$

$$\text{OR-1} \quad (011)_{ц} \parallel (101)_{ф} \\ [311]_{ц} \parallel [111]_{ф} \\ [100]_{ц} \ 2,4 \square \square \text{от } [131]_{ф}$$

$$\text{OR-1} \quad (210)_{ц} \parallel (101)_{ф} \\ [001]_{ц} \parallel [131]_{ф} \\ [121]_{ц} \ 5,95 \square \square \text{от } [101]_{ф}$$

Сопоставительный анализ ОС Исайчева и ОС Питча показал, что их основное различие заключается в том, что ферритная решётка по ОСП повернута относительно ОСИ на 32° вокруг оси, перпендикулярной $(1|03)_{ц} \parallel (1|01)_{ф}$. В концепции решёток совпадающих узлов поворот на такой угол (точнее $31,59^\circ$) кубической решётки вокруг $[1|01]$ создаёт специальную ориентацию с обратной плотностью совпадающих узлов $\Sigma 27$. Это значит, что если внутри цементитного каркаса существуют ферритные зёрна перлитного феррита, то между ними формируются специальные низкоэнергетические границы $\Sigma 27$. Кроме того, это позволяет в одном зерне феррита зародиться несколькими ориентациями цементита, что часто наблюдается в доэвтектоидных сталях. На основе этих аргументов была предложена основная формула и построена стереопроекция соотношения феррит-цементит в перлите, являющегося более обоснованным и более строго описывающим физическую суть диффузионного распада аустенита. В новом варианте соотношение может быть записано следующим образом.

$$(100)_{ц} \parallel (16.7|5)_{ф} \quad (010)_{ц} \parallel (131)_{ф} \\ (001)_{ц} \parallel (2|1|5)_{ф} \quad (8)$$

Это соотношение отличается не только от альтернативных соотношений, предложенных в работе [14], но и от оригинального ОС Питча [17] поворотом на $2,8^\circ$ вокруг нормали к $(1|03)_{ц}$, при этом было принято, что $(1|03)_{ц} \parallel (1|01)_{ф}$.

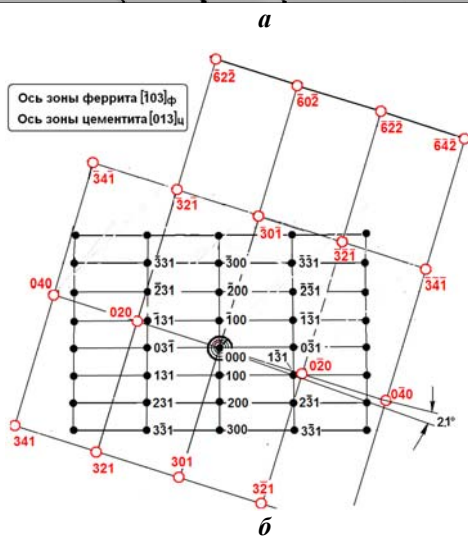
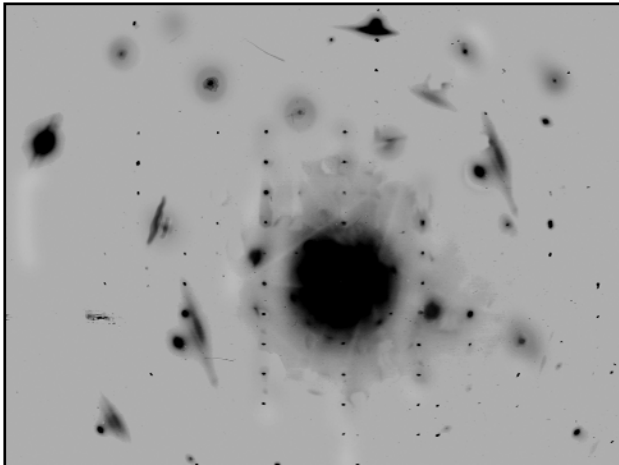
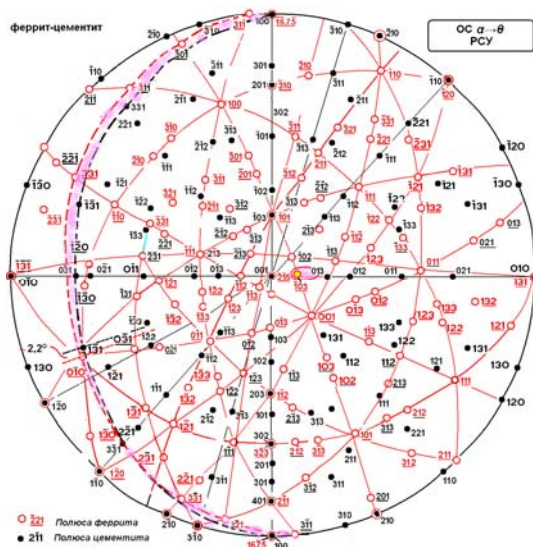


Рис. 2. Микродифракционная картина (а) и схема её индцирования (б) от колонии перлита в стали 20 после изотермической выдержки при 550 °С.

Взаимный разворот двух систем рефлексов с точностью до 0,2° согласуется с ОС, представленным матрицей (7) и стереопроекцией на рис. 1



Соответствующая матрица ОС феррит-цементит выглядит следующим образом:

$$R_{PN} = \begin{pmatrix} 0.59289 & 0.51953 & 0.1332 \\ -0.53300 & 0.59289 & 0.0598 \\ -0.05989 & -0.13324 & 0.7866 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Электроннограммы от колоний перлита во всех исследованных сталях подтверждают, что взаимное расположение двух систем рефлексов согласуется с ОС, представленным матрицей (9) и стереопроекцией на рисунке 1.

Для примера на рисунке 2а приведена микродифракционная картина от колонии перлита в микролегированной стали 20, а на рисунке 2б – её схема индцирования рефлексов феррита, принадлежащих зоне [1||03]ф и рефлексов цементита, расположенных в зоне [013]ц. Обе оси этих зон отмечены затемнённым овалом вблизи (001)ц на стереопроекции (рис. 1).

На схеме (рис. 2б) показан угол $2,1 \pm 0,2^\circ$, измеренный между направлениями рядов рефлексов (020)ф и (13|1)ц. Именно такой угол между этими полюсами плоскостей наблюдается и на стереопроекции на рисунке 1. В то же время на стереопроекции, построенной в соответствии с требованиями оригинальной работы Питча [17], этот же угол практически равен нулю. Это подтверждает, что экспериментальные дифракционные картины хорошо согласуются с закономерностями, описываемые матрицей (9), выражением (8) и стереопроекцией на рисунке 1.

Построение взаимного расположения узлов решёток феррита и цементита в плоскостях (100)ф и (31|1)ц показывает вид со стороны [100]ц (рис. 3), что узлы, близкие к совпадению образуют регулярный, периодический узор, указывающий на возможность образования низкоэнергетических межфазных границ в случае реализации соотношения феррит-цементит, представленного матрицей (9).

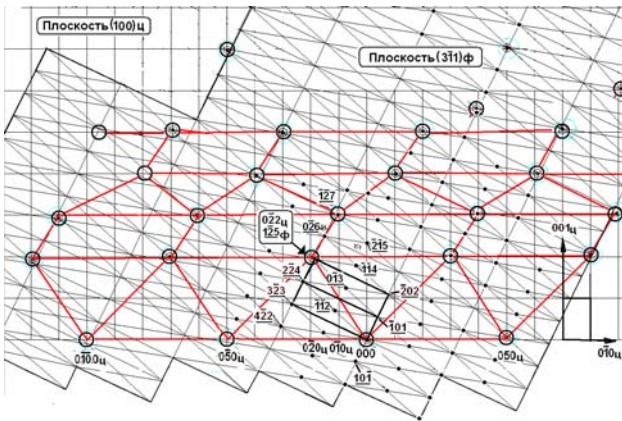


Рис. 3. Образование решётки близких к совпадению узлов при наложении плоскостей $(100)\alpha$ и $(311)\phi$ в соответствии с ОС (7).

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Выводы.

1. При структурных превращениях, в которых возникает кристаллографическая связь феррит-цементит, реализуется ориентационное соотношение Исайчева [5], а не Багаряцкого [3].

2. Установлено новое ориентационное соотношение между ферритом и цементитом в перлите.

3. Предложены новые, высокоточные (не хуже $0,1^\circ$) матрицы ориентационного и размерного соответствия для кристаллографических связей:

а) ориентационного соотношения аустенит-цементит по Арбузову-Курдюмову;

б) ориентационного соотношения аустенит-феррит по Курдюмову-Заксу;

в) ориентационного соотношения феррит-цементит по Исайчеву;

г) ориентационного соотношения феррит-цементит, предложенному в этой работе.

4. Выполнена рабочая двойная стереографическая проекция нового ОС феррит-цементит в перлите. Она пригодна для практического использования после увеличения её диаметра до 200 мм.

5. Показано, что при реализации между ферритом и цементитом предложенного ориентационного соотношения в перлите возникает решётка близких к совпадению узлов с образованием периодически повторяющегося узора.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Орлов А. Н. Границы зерен в металлах / А. Н. Орлов, В. Н. Перевезенцев, В. В. Рыбин. – Москва : Металлургия, 1980. – 224 с.
2. Kurdumov G. V. Über das Mechanismus der Stahlhärtung / Kurdumov G. V., Sachs G. // Zeitschrift für Physik. – 1930. – Vol. 64, iss. 5/6. – P. 325–343.
3. Nishiyama Z. X-ray investigation of the mechanism of the transformation from face-centred cubic lattice to body-centred cubic / Nishiyama Z. // Science Reports of the Tohoku Imperial University. – 1934. – Vol. 23, № 4. – P. 637–642.
4. Greninger A. B. Crystallography of austenite decomposition / Greninger A. B., Troiano A. R. // Transactions of the AIME. – 1940. – Vol. 140. – P. 307–336.
5. Исайчев И. В. Ориентация цементита в отпущенной углеродистой стали / Исайчев И. В. // Журнал технической физики. – 1947. – Т. 17, вып. 7. – С. 835–838.
6. Арбузов М. Э. Ориентировка кристаллов цементита в отпущенной стали / Арбузов М. Э., Курдюмов Г. В. // Журнал технической физики. – 1941. – Т. 11, вып. 5. – С. 412–416.
7. Багаряцкий С. А. Вероятный механизм распада мартенсита / Багаряцкий С. А. // Доклады Академии наук СССР. – 1950. – Т. 73, № 6. – С. 1161–1164.
8. Andrews K. W. An electron diffraction study of pearlite / Andrews K. W., Dyson D. N. // Iron and Steel. – 1967. – Vol. 40, № 10. – P. 40–45, P. 93–98.
9. Ohmori Y. Crystallography of pearlite / Y. Ohmori, A. T. Davenport, R. W. K. Honeycombe // Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan. – 1972. – Vol. 12. – P. 128–137.
10. Ohmori Y. Crystallographic analysis of lower bainite transformation in Fe-0.7% C alloy // Materials transactions / Japan institute of metals. – 1989. – Vol. 30, № 7. – P 487–497.
11. Утевский Л. М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении / Л. М. Утевский. – Москва : Металлургия, 1973. – 584 с.

12. Shakleton D. N. Orientation relationships in pearlite and the form of the pearlite-austenite interface / D. N. Shakleton, P. M. Kelly // *Journal of the Iron and Steel Institute*. – 1969. – Vol. 207, № 12. – P. 1253–1254.
13. Ориентационные соотношения феррит-цементит / В. И. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Д. В. Лаухин, А. В. Бекетов // *Theoretical foundations of civil engineering : Polish-Ukrainian Transactions (conference)*, Warsaw, September, 2011 / ed. by W. Szczesniak. – Warsaw, 2011. – Vol. 19. – P. 351–358.
14. Zhang M-X. Accurate orientation relationships between ferrite and cementite in pearlite / M-X. Zhang, P. M. Kelly // *Scripta materialia*. – 1997. – Vol. 47, iss. 11. – P. 749–755.
15. Курдюмов Г. В. Превращения в железе и стали / Г. В. Курдюмов, Л. М. Утевский, Р. И. Энтин. – Москва : Наука, 1977. – 238 с.
16. Grimmer H. Coincidence-Site lattices and complete pattern-shift lattices in cubic crystals / Grimmer H., Bollman W., Warrington D. T. // *Acta Crystallographica. Section A : Crystal Physics, Diffraction, Theoretical and General Crystallography*. – 1974. – Vol. 30, iss. 2. – P. 197–207.
17. Pitsch W. Der Orientierungszusammenhang zwischen Zementit und ferrit im perlit / W. Pitsch // *Acta metallurgica*. – 1962. – Vol. 10, iss. 9. – P. 897–900.

REFERENCES

1. Orlov A.N., Perevezentsev V.N. and Rybin V.V. *Granitsy zeren v metallakh* [Grain boundaries in metals]. Moskva: Metallurgiya, 1980, 224 p. (in Russian).
2. Kurdyumov G.V. and Sachs G. *Über das Mechanismus der Stahlhärtung. Zeitschrift für Physik*. 1930, vol. 64, iss. 5-6, pp. 325–343. (in German).
3. Nishiyama Z. *X-ray investigation of the mechanism of the transformation from face-centred cubic lattice to body-centred cubic. Science Reports of the Tohoku Imperial University*. 1934, vol. 23, no. 4, pp. 637–642.
4. Greninger A.B. and Troiano A.R. *Crystallography of austenite decomposition. Transactions of the AIME*. 1940, vol. 140, pp. 307–336.
5. Isajchev I.V. *Orientatsiya tsementita v otpushchennoj uglerodistoj stali* [Orientation of cementite in the tempered carbon steel]. *Zhurnal tehnicheckoj fiziki* [Technical physics journal]. 1947, vol. 17, iss. 7, pp. 835–838. (in Russian).
6. Arbutov M.Ye. and Kurdyumov G.V. *Orientirovka kristallov tsementita v otpushchennoj stali* [Orientation of cementite crystals in the tempered steel]. *Zhurnal tehnicheckoj fiziki* [Technical physics journal]. 1941, vol. 11, iss. 5, pp. 412–416. (in Russian).
7. Bagaryatskij S.A. *Veroyatnyj mekhanizm raspada martensita* [The probable mechanism of martensite decay]. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Reports of Scientific Academy of USSR]. 1950, vol. 73, no. 6, pp. 1161–1164. (in Russian).
8. Andrews K.W. and Dyson D.N. *An electron diffraction study of pearlite. Iron and Steel*. 1967, vol. 40, no. 10, pp. 40–45, pp. 93–98.
9. Ohmori Y., Davenport A.T. and Honeycombe R.W.K. *Crystallography of pearlite. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1972, vol. 12, pp. 128–137.
10. Ohmori Y. *Crystallographic analysis of lower bainite transformation in Fe-0.7% C alloy. Materials transactions. Japan institute of metals*. 1989, vol. 30, no 7, pp. 487–497.
11. Utevsckij L.M. *Difraktsionnaya elektronnaya mikroskopiya v metalovedenii* [The diffraction electron microscopy in metal science]. Moskva: Metallurgiya, 1973, 584 p. (in Russian).
12. Shakleton D.N. and Kelly P.M. *Orientation relationships in pearlite and the form of the pearlite-austenite interface. Journal of the Iron and Steel Institute*. 1969, vol. 207, no. 12, pp. 1253–1254.
13. Bolshakov V.I., Sukhomlin G.D., Laukhin D.V. and Beketov A.V. *Orientatsionnye sootnosheniya ferrit-tsementit* [The orientation relations of the ferrite-cementite]. *Theoretical foundations of civil engineering: Polis-Ukrainian Transactions (conference)*. Warsaw, 2011, vol. 19, pp. 351–358. (in Russian).
14. Zhang M-X. and Kelly P.M. *Accurate orientation relationships between ferrite and cementite in pearlite. Scripta materialia*. 1997, vol. 47, iss. 11, pp. 749–755.
15. Kurdyumov G.V., Utevsckij L.M. and Yentin R.I. *Prevrashcheniya v zheleze i stali* [Transformations in the iron and steel]. Moskva: Nauka, 1977, 238 p. (in Russian).

16. Grimmer H., Bollman W. and Warrington D.T. *Coincidence-Site lattices and complete pattern-shift lattices in cubic crystals. Acta Crystallographica. Section A: Crystal Physics, Diffraction, Theoretical and General Crystallography.* 1974, vol. 30, iss. 2, pp. 197–207.
17. Pitsch W. *Der Orientierungszusammenhang zwischen Zementit und ferrit im perlit. Acta metallurgica.* 1962, vol. 10, iss. 9, pp. 897–900. (in German).

Рецензент: д-р. фіз-мат. н. Башев В. Ф.

Надійшла до редколегії: 24.03.2016 р. Прийнята до друку: 24.03.2016 р.