

## Новый механизм растворения углерода в решетке аустенита при цементации стали и его поведение при мартенситном и перлитном превращениях аустенита

77-30569/262290

# 11, ноябрь 2011

Крапошин В. С.

УДК 669.017:669.74

МГТУ им. Н.Э. Баумана

[kraposhin@gmail.com](mailto:kraposhin@gmail.com)

### Введение

В основе описания образования зародыша новой фазы при полиморфных превращениях железа и титана в предыдущих работах автора [1, 2] лежит реконструкция координационного полиэдра исходной фазы в координационный полиэдр новой фазы без изменения числа вершин. Элементарным актом реконструкции любого полиэдра является переброска диагоналей ромбической грани, которая представляется как объединение двух треугольных граней по общему ребру (диагонали). На основе этих работ была предложена единая модель образования из аустенита мартенсита и перлита (смеси цементита и феррита), основанная на переброске диагоналей ромбических граней (межатомных связей), приводящей к реконструкции координационных полиэдров [3]. Основные положения модели следующие:

1. Основным структурным элементом, образующим когерентную границу двойника по плоскости  $\{113\}$  ГЦК-решетки (рис. 1) является 9-вершинный полиэдр Бернала, т.е. тригональная призма с полуоктаэдрическими шапочками по всем боковым граням. Девятивершинный полиэдр Бернала образуется из икосаэдра переброской трех ребер, объединенных осью симметрии третьего порядка (см. рис. 2).

Сам икосаэдр образуется реконструкцией кубооктаэдра (первой координационной сферы ГЦК-решетки) согласно модели полиморфного превращения железа, предложенной в [1]. Найденная в работе [3] последовательность перебросок диагоналей граней в двойниковой прослойке  $\{113\}$ , переводит ее в кристаллическую структуру цементита  $Fe_3C$  (рис. 3). Изменение координации атома углерода от октаэдрической к

призматической понижает уровень искажений ребер координационных полиэдров, соответственно стабилизирует характерные для цементита призматические атомные конфигурации железа.

2. Найденная схема перестройки структуры аустенита в структуру цементита диктует ориентационные соотношения между этими фазами, совпадающие с экспериментально найденными ориентационными соотношениями Исайчева.

3. Полисинтетические множественные двойники по плоскостям  $\{113\}$  ГЦК-решетки толщиной в несколько межатомных расстояний могут быть получены реконструкцией кубооктаэдра в икосаэдр и октаэдра в тригональную призму (недеформационное двойникование). Атомное строение такого двойника с точностью до малых деформаций ребер неотлично от строения множественного полисинтетического двойника, образованного по плоскостям  $\{112\}$  ОЦК-решетки. Соответственно мартенситное превращение в сталях выполняется по схеме – недеформационное микродвойникование аустенита - раздвойникование в ОЦК-структуру. Эта схема предписывает параллельность  $\{113\}$  аустенита плоскостям феррита  $\{112\}$ , и все наблюдаемые в эксперименте ориентационные соотношения аустенит-мартенсит (Курдюмова-Закса, Нишияма-Вассермана, Гренингера-Трояно) являются следствием предложенной схемы недеформационного двойникования (рис. 4).

Однако, предложенная в [3] схема перестройки структуры аустенита в структуры феррита (мартенсита) и цементита, принимает во внимание лишь стабилизацию

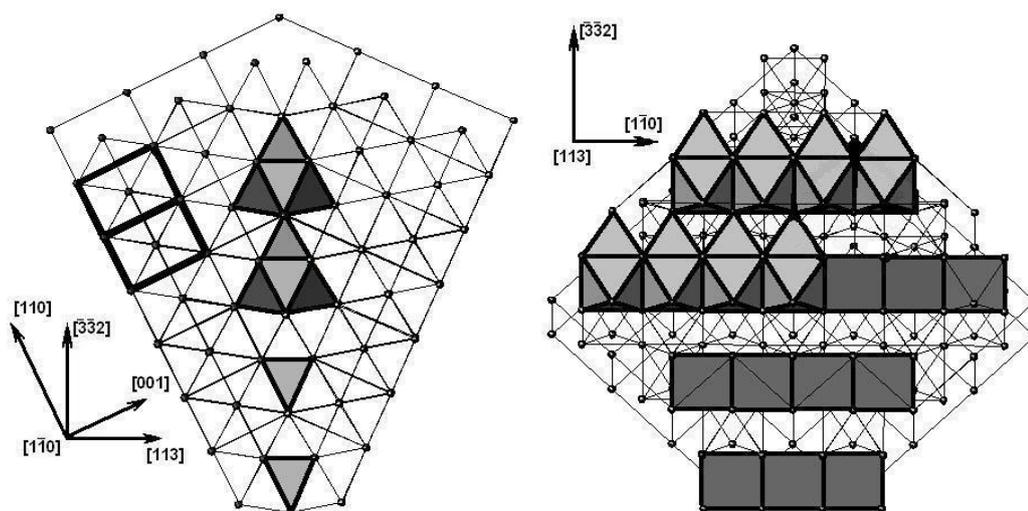


Рис. 1. Двойник (113) в ГЦК-упаковке дает колонну (стержень) тригональных призм, пригодных для размещения углерода [3].

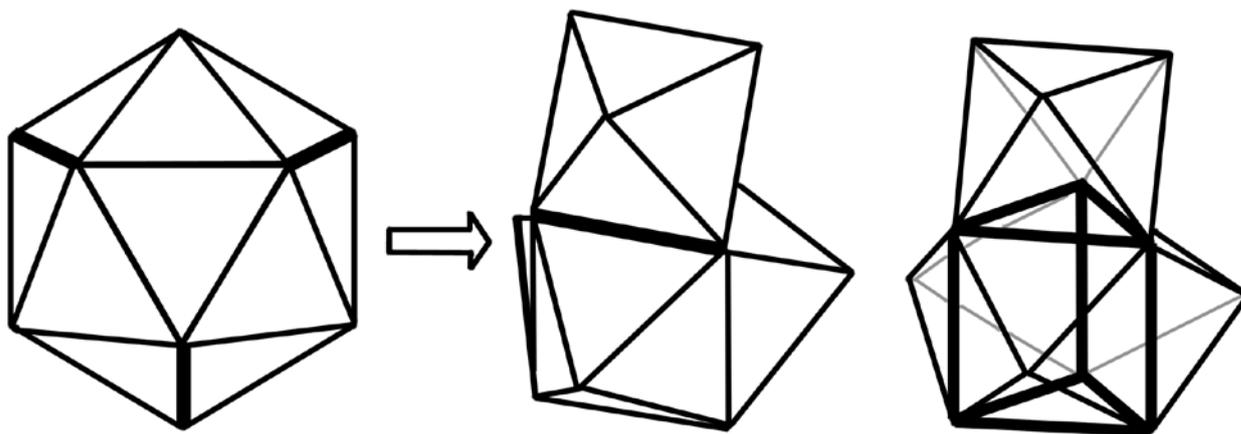


Рис. 2. Переброска трех ребер икосаэдра (выделены) реконструирует его в полиэдр Бернала с 9 вершинами и присоединенный октаэдр (в центре).

Справа для наглядности конечный полиэдр изображен прозрачным, тригональная призма выделена жирными линиями [3].

призматической атомной конфигурации, но не учитывает особенности растворения углерода в аустените. Кроме того, показанная на рис. 2 реконструкция икосаэдра в 9-вершинный полиэдр Бернала (с присоединенным октаэдром) предполагает реконструкцию пустого икосаэдра. Но в реальности, икосаэдр должен быть центрирован, т.к. образуется из центрированного кубооктаэдра ГЦК-структуры. Схема из работы [3] может быть принята, если реконструируется пустой кубооктаэдр, т.е. содержащий вакантный узел решетки. Но тогда превращение становится сильно зависящим от температуры, тогда как мартенситное превращение во многом атермическое, т.е. происходит с одинаковой скоростью ниже температуры начала мартенситного превращения  $M_n$  [4]. Обнаружение изотермического мартенситного превращения [4] не снимает проблему, т.к. оно все равно протекает с большой скоростью и при низких температурах, когда концентрация вакансий чрезвычайно мала. В настоящей работе предлагается новая модель растворения углерода в аустените, которая не только устраняет перечисленные проблемы реконструкции координационных полиэдров, но и объясняет высокую растворимость углерода в аустените, достигающую 9 ат. % (2 вес. %). Такая высокая растворимость несовместима с малостью октаэдрической пустоты по сравнению с диаметром углерода.

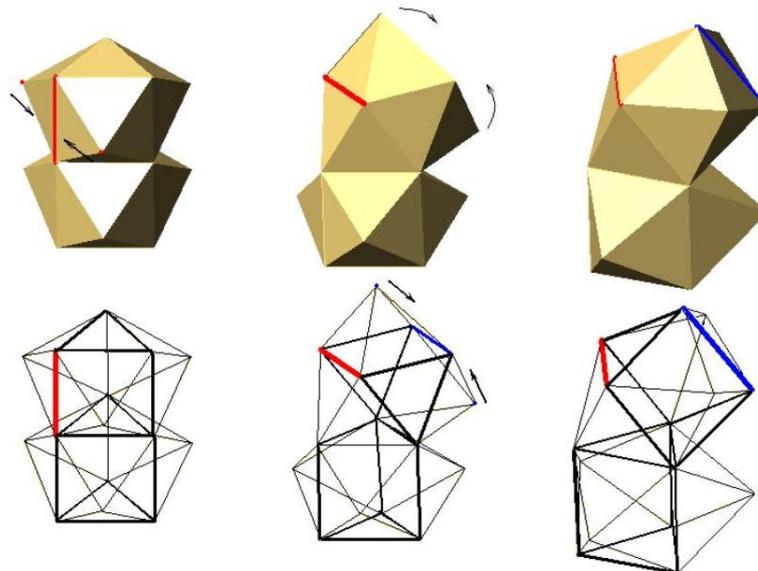


Рис. 3. Переброска выделенных цветом ребер в двойнике (слева) переводит его через промежуточную конфигурацию ( в центре) в структуру цементита (справа)

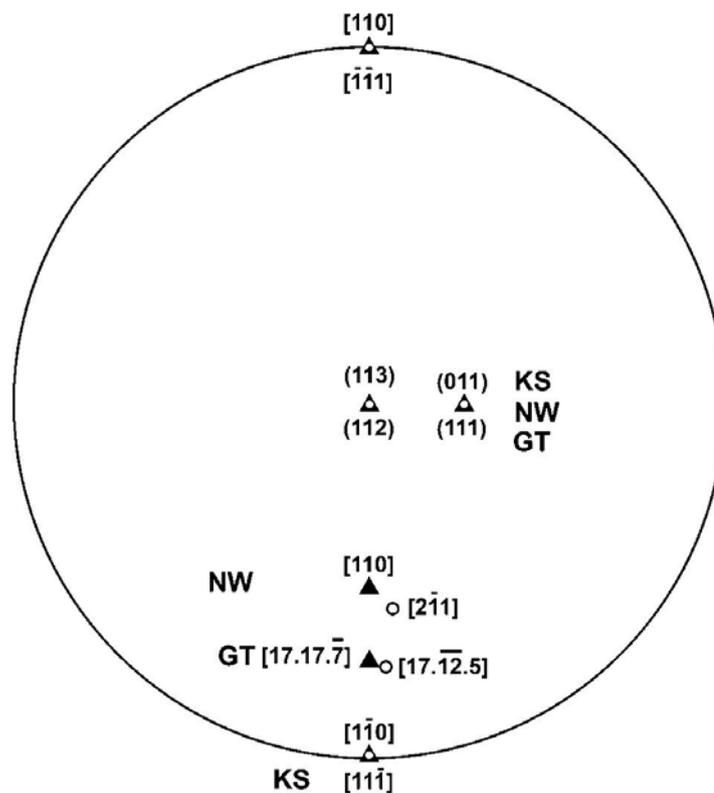


Рис. 4. Предложенный механизм двойникования-раздвойникования диктует соотношение:  $(113)_{\text{ГЦК}} \parallel (112)_{\text{ОЦК}}$ , откуда и вытекают все наблюдаемые ориентационные соотношения (треугольники соответствуют ОЦК, круги- ГЦК-фазе): KS- Курдюмова – Закса, NW – Нишиямы-Вассермана, GT – Гренингера-Трояно

## Модель.

Найти пути построения новой модели растворения углерода в твердом аустените помогают данные о растворении углерода в жидком железе. Анализ многочисленных экспериментальных данных для расплавов железо-углерод, выполненный В.М. Залкиным [5, 6] показывает следующее:

- 1 При содержании углерода в расплаве менее 2 вес. % ближнее атомное окружение углерода приблизительно соответствует аустенитной фазе твердого состояния.
- 2 При содержании углерода в сплаве 2-6 вес. % в интервале температур 1300-1700 °С расплавы представляют собой дисперсную систему, компонентами которой являются раствор углерода в жидком железе с концентрацией углерода 2 вес. % и ближним порядком, близким к аустениту, а также области ближнего порядка, соответствующие цементиту  $Fe_3C$ .

Эти представления хорошо согласуются с данными о фазовом составе и структуре двойных сплавов железо-углерод после закалки расплава со скоростями более  $10^5$  град/с, приведенными на рис. 5 по данным В.С. Крапошина и др. [7]. Можно видеть, что количество остаточного аустенита по данным многих работ максимально при 2 вес. % С. Кроме того, согласно данным [8], максимально достигнутая концентрация углерода в аустените после закалки расплава со скоростями  $10^4$ - $10^7$  град/с составляет около 9 ат. %, т.е. не превышает максимальной растворимости углерода в аустените. По данным [9] в металлической матрице закаленного из жидкого состояния эвтектического сплава железо-углерод присутствуют высокодисперсные (несколько нанометров) частицы цементита, дающих на электронограммах четкие дебаевские кольца. Это прямое подтверждение присутствия в расплавах железо-углерод, содержащих более 2 вес. % углерода, областей ближнего порядка со структурой, близкой цементиту. Крупные (толщиной порядка 1 мкм) монокристалльные пластины эвтектического цементита, наблюдаемые в этом образце, вполне могли служить эффективной подложкой для эпитаксиального твердофазного зарождения частиц избыточного цементита при охлаждении. Но тогда мы вряд ли наблюдали бы такое однородное распределение монодисперсных равноосных частиц цементита в железной матрице.

Ограниченная растворимость углерода в жидком железе и совместное существование областей ближнего порядка с конфигурацией аустенита (ГЦК-упаковки) и цементита вызывает необходимость кристаллохимической интерпретации этих фактов. На первый взгляд, проблемы с координацией углерода и в твердом, и в жидком состоянии

железа нет. В жидком состоянии, также как и в твердом, в равновесии находятся области ближнего порядка аустенитного и цементитного типов. Общепринятыми являются представления о размещении атома углерода соответственно в октаэдрической поре ГЦК-структуры аустенита, и в тригональной призме кристаллической структуры цементита [10]. Если принять, что атом углерода размещен в октаэдрической поре аустенита (в центре ребра куба) то переход от ближнего порядка ГЦК-структуры к ближнему порядку

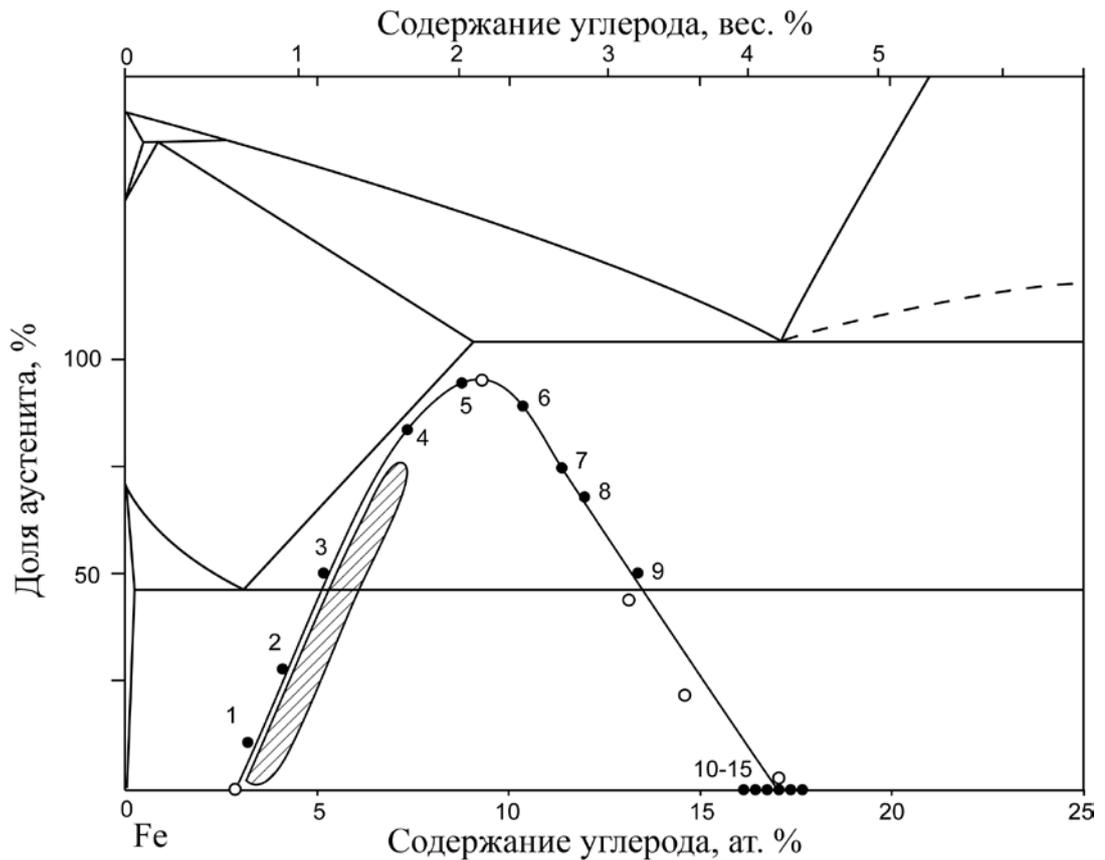


Рис. 5. Зависимость доли остаточного аустенита в сплавах Fe-C, закаленных из жидкого состояния, по данным разных работ (светлые кружки – [7]; остальные ссылки в [7]).

структуры цементита объясняется довольно просто. Отношение атомных радиусов углерода и железа составляет 0,613, т.е. диаметр атома углерода почти на 50 % превышает диаметр октаэдрической поры в структуре аустенита (0,414 диаметра атома железа). В своем стремлении расширить занимаемый им объем атом углерода может вызвать реконструкцию октаэдрической поры в призматическую, характерную для кристаллической структуры цементита. Для этого достаточно развернуть 2 параллельные треугольные грани октаэдра в зеркально-симметричное положение [3]. Современные

теоретические представления и экспериментальные данные, относящиеся к атомной структуре расплавов, указывают на преимущественно икосаэдрическую координацию атомов в жидкометаллической фазе. Сам переход кристалл-жидкость для металлов был рассмотрен как реконструкция первой координационной сферы соответствующей кристаллической структуры в один из полиэдров Франка-Каспера с 12 (икосаэдр) или 14 вершинами [11]. Поскольку сам кубookтаэдр (первая координационная сфера ГЦК-структуры) является топологическим икосаэдром, когда мы говорим о структуре ближнего порядка расплава железо-углерод, близкой к аустениту, мы на самом деле имеем дело с икосаэдрическим ближним порядком, который является естественным наследником ГЦК-структуры при ее расплавлении.

Максимальная растворимость углерода в твердом железе представляет собой критическую концентрацию, выше которой решетка аустенита становится нестабильной относительно вносимых углеродом искажений. Если принять размещение углерода в октаэдрической поре, то в жидкой фазе железа появляются проблемы. Полиэдры Франка-Каспера собраны только из тетраэдров, Диаметр тетраэдрической поры гораздо меньше диаметра октаэдрической поры, поэтому при переходе аустенита в жидкое состояние (превращения кубookтаэдра в икосаэдр) углерод должен быть где-то размещен. В работе [11] было показано, что при плавлении металла с ГЦК-структурой образующиеся в точке плавления икосаэдры объединяются в геликоид, При статистическом распределении геликоидальных нитей в объеме расплава между ними обязательно будет некоторое количество октаэдрических пор. С этой точки зрения атому углерода есть, где разместиться, число октаэдрических пор будет примерно пропорционально длине геликоида. Эта последняя ничем не ограничена, поэтому становится непонятным существование критической концентрации углерода в жидком железе, выше которой ближний порядок, соответствующий аустениту, заменяется ближним порядком, характерным для цементита. Непонятна также высокая растворимость углерода в твердом аустените (9 ат. %). Разница диаметров углерода и октаэдрической поры в 50 % невыносима для кристаллической решетки (плавление соответствует увеличению длины межатомных связей на 10 %).

На другую возможность размещения углерода указывает близость величин периодов решеток аустенита и кубического алмаза (355,5 и 356,7 пм соответственно). Поскольку в обоих случаях решетка гранцентрированная кубическая, имеет место равенство ребер октаэдров и тетраэдров, из которых сложена ГЦК-решетка. Значит, мы практически без искажений можем заменить тетраэдр, образованный атомами железа, на тетраэдр,

образованный атомами углерода, только этот тетраэдр будет центрирован атомом углерода (см.рис. 6). При таком размещении мы получаем некоторый синтез раствора замещения и раствора внедрения. В этом случае искажения решетки аустенита будут определяться главным образом разницей периодов решетки аустенита и алмаза, составляющей около 1 пм. Экспериментально установлено, что период решетки аустенита линейно растет с концентрацией, так что равенство периодов решеток аустенита и алмаза достигается при 0,27 вес. % С. Согласно [11] кубооктаэдр ГЦК структуры, содержащий алмазный тетраэдр, при плавлении реконструируется в икосаэдр, поэтому проблемы размещения углерода при такой реконструкции не возникает, алмазный тетраэдрический кластер теперь включен в икосаэдрическую конфигурацию (рис. 7). Поскольку углеродный (алмазный) тетраэдр с более жесткими, чем в металле, связями, встроен в железный икосаэдр, критическая концентрация углерода для перехода к ближнему порядку цементитного типа становится понятной. Выше на рис. 2 было показано, что переброска трех ребер икосаэдра переводит икосаэдр в объединение октаэдра и 9-вершинного полиэдра Бернала. Сам 9-вершинный полиэдр Бернала представляет собой объединение тригональной призмы с тремя полуоктаэдрическими шапочками по боковым прямоугольным граням. Важно, что при таком размещении углерода исходный кубооктаэдр центрирован атомом углерода, соответственно центрирован и полученный из него икосаэдр. Для того, чтобы объяснить наблюдаемый в расплаве примерно при 2 вес.% С переход от ближнего порядка типа аустенита к ближнему порядку типа цементита, необходимо дополнить показанную на рис.2 чисто геометрическую схему химическим процессом разрыва четырех алмазных связей углерод-углерод в тетраэдрическом углеродном кластере, встроенном в икосаэдр. При этом один из атомов углерода оказывается сразу захваченным призмой. Центрированная углеродом призма дает основную строительную единицу кристаллической структуры цементита. По-видимому, затраты энергии на разрушение этих связей и объясняют эндотермическую природу цементита.

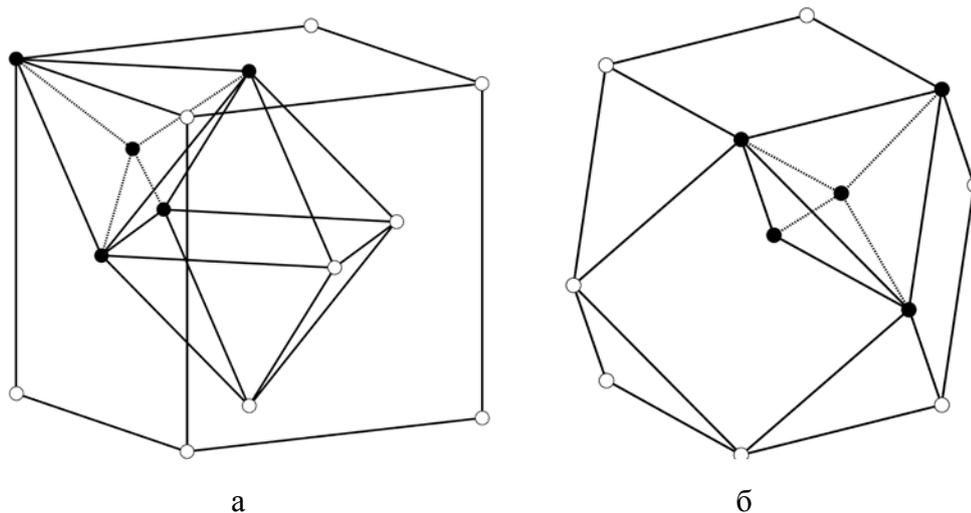


Рис. 6. Размещение алмазного центрированного тетраэдра углерода (черные кружки) в элементарной ГЦК ячейке аустенита (а) и в первой координационной сфере ГЦК-ячейке – кубооктаэдре (б)

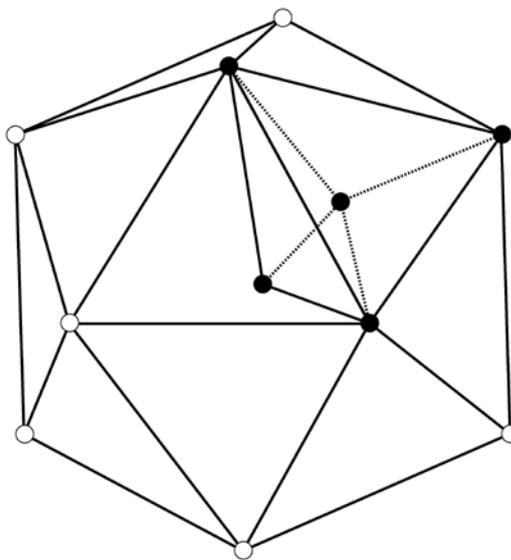


Рис. 7. Размещение алмазного кластера в икосаэдрическом кластере железо-углерод

### 3. Обсуждение результатов.

Подобная схема размещения углерода в структуре аустенита прежде всего объясняет его высокую растворимость при наличии малых искажений металлической решетки. Прямые подтверждения данной модели имеются в данных ядерной гамма-спектроскопии (эффект Мёссбауэра), приведенных в работе [12]. По данным этой и некоторых других работ (ссылки в [12]) ЯГР-спектры аустенита содержат линии от

атомов железа, в первой координационной сфере которых присутствуют гантели (пары) атомов углерода, заселяющих соседние октаэдрические поры, и ось гантели ориентирована вдоль  $\langle 110 \rangle$  аустенита. Обычной моделью размещения изолированных атомов углерода в октаэдрических пустотах аустенита этот факт объяснить невозможно: растворенные атомы углерода должны отталкиваться вследствие высоких полей упругих искажений. Более того, термодинамический анализ показал, что активность углерода в аустените не зависит от его концентрации [13], и авторы этой монографии подсчитали, что один атом углерода в октаэдрической поре аустенита делает невозможным его размещение в пяти соседних порах. Заметим, что в предлагаемой модели углеродный алмазный кластер содержит именно 5 атомов. Размещение углерода в чужой решетке в виде целого кластера вовсе не является экзотическим- имеется много двойных и тройных фаз, в которых атом второго компонента размещается в решетке другого компонента в виде кусков собственной кристаллической структуры: гантелей, треугольников, тетраэдров [14] и даже октаэдров [15].

Тогда роль углерода при превращениях аустенита предельно ясна: стекая в слой призм в двойнике аустенита и стабилизируя призмы (рис.1), углерод предопределяет формирование пластины цементита при перлитном превращении. Концентрируясь в слое призм множественного двойника, углерод уходит из слоя соседних призм. Пустые (обезуглероженные) призмы механически нестабильны, они реконструируются (раздвойниковаются) в ОЦК – структуру (по механизму, описанному в [2], т.е. образуют слой безуглеродистого феррита вокруг цементитной пластины. При высоких скоростях охлаждения образуется мартенситная пластина с т.н. мидрибом, т.е. скоплением углерода со специфической конфигурацией металлических атомов (будущим карбидом). Понятна и причина снижения температуры  $M_n$  при увеличении содержания углерода: чем больше углерода, больше стабилизированных углеродом призм, они живут дольше и не раздвойниковаются, соответственно не образуется феррит, дающий магнитный импульс при магнитометрическом анализе. Данная схема превращения действует при всех концентрациях углерода, даже самых низких: т.н. речный мартенсит является продуктом рекристаллизации двойниковой наноструктуры, представляющей собой сущность мартенсита. Рекристаллизация обеспечивается более высокой мартенситной точкой в сталях, содержащих менее 0,6 вес. % С (граница между речным и двойниковым мартенситом в нелегированных сталях). Предложенная схема, возможно, позволит объяснить каталитическое действие металлов подгруппы железа при превращениях графит-алмаз: для растворения графита в железе (никеле, кобальте) она

требует образования фрагмента структуры алмаза - центрированного тетраэдра. В случае цементации становится понятным разница кинетики проникновения углерода в железо из слоев графита (сажи) или карбидного слоя.

И последнее замечание: предложенные в качестве модели преобразования полиэдров и размещение углерода в решетке металла и кластере расплава в виде фрагмента структуры алмаза не являются случайным выбором из произвольного набора векторов, а представляет собой реализацию одной из конструкций алгебраической геометрии, определяющей взаимное упорядочение тетраэдрических (металлических) и тетракоординированных (алмазоподобных) [16].

#### 4. Выводы

1. Предложена новая модель размещения углерода в кристаллической структуре аустенита. Углерод растворяется в аустените в виде центрированного тетраэдра, представляющего собой фрагмент структуры алмаза. Вершины углеродного тетраэдра размещаются в узлах решетки аустенита, пятый атом углерода оказывается в центре углеродного тетраэдра, не вызывая искажений решетки аустенита. Такое размещение углерода основано на малой разности периодов решеток аустенита и алмаза (1,2 пм при комнатной температуре).
2. Модель подтверждается данными ядерной гамма-спектроскопии, указывающей на присутствие гантелей атомов углерода, ориентированных вдоль  $\langle 110 \rangle$  аустенита.
3. Согласно предложенной модели роль углерода при перлитном и мартенситном превращениях сводится к стабилизации призматической конфигурации атомов железа, благодаря чему из аустенита выделяется цементит, а полиморфное превращение в железе выполняется образованием полисинтетических двойников в ГЦК-решетке и их раздвойникованием в ОЦК-структуру. Стабилизированные призмы микродвойников порождают цементитные пластины при перлитном превращении и мидриб внутри мартенситных пластин при мартенситном превращении.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы», ГК № 16.523.11.3010 по теме «Создание комплекса вакуумных и ионно-вакуумных технологий химико-термической обработки деталей машин с получением

наноструктурированного состояния диффузионных слоёв», а также при финансовой поддержке РФФИ (проекты 10-02-00602, 11-02-00296).

#### Список литературы

- 1 Kraposhin V.S., Pankova M.N., Talis A.L., Freiman Yu.A. An application of a polytope (4D-polyhedron) concept for the description of polymorphic transitions: iron martensite and solid oxygen// J.Phys. IY France, 112(2003) 119-122.
- 2 Kraposhin V.S., Talis A.L., Wang Y.J. Description of polymorphic transformations of Ti and Zr in the framework of the algebraic geometry // Materials Science and Engineering A. – 2006. – V.438-440. – P.85-89.
- 3 Крапошин В.С., Сильченков А.Д. Кристаллографический механизм перлитного превращения в системе железо-углерод// Проблемы черной металлургии и металловедения. -2009.-№2.-С.55-64.
- 4 Курдюмов В.Г., Утевский Л.М., Энтин Р.И. /Превращения в железе и стали. М.:Наука, 1977.- 236 с.
- 5 Залкин В.М. /Природа эвтектических сплавов и эффект контактного плавления. М.: Металлургия, 1987. 152 с.
- 6 Залкин В.М., Крапошин В.С. Строение железоуглеродистых расплавов. О стабильности цементита в расплавах//Металловедение и термическая обработка металлов. 2010. №4. С.15-18.
- 7 Крапошин В.С., Шахлевич К.В. Фазовый состав железоуглеродистых сплавов после закалки из жидкого состояния//Изв. АН СССР. Металлы. 1989. № 5. С. 107-112.
- 8 Kraposhin V. S. Supersaturated solid solutions of carbon in Fe, Co, and Ni: correlation with carbide stability //International Journal of Non-Equilibrium Processing. 1998. V. 10. P. 333-338.
- 9 Аронин А.С., Крапошин В.С., Шахлевич К.В. Структура высокоуглеродистых сплавов железа после закалки из жидкого состояния и отпуска //Металлофизика. 1990. Т. 12. №4. С.96-101.
- 10 Fasiska E. J., Jeffrey G. A. On the cementite structure//Acta Crystallografica. 1965. V.19. P. 463-471.
- 11 Kraposhin V.S., Talis A.L., Samoylovitch M.I. Axial (helical) substructures determined by the root lattice E8 as generating clusters of the condensed phases// Journal of Non-Crystalline Solids.- 2007.-V.353.-P.3279-3284.

- 12 Gavriljuk V.G. Carbon and nitrogen in iron-based austenite and martensite: An attempt at comparative analysis//J. Phys. IV France. 2003.- V.112.-P.51-59.
- 13 Могутнов Б.М., Томилин И.А., Шварцман Л.А./Термодинамика железоуглеродистых сплавов. М.: Металлургия, 1972. -328 с.
- 14 Schubert K. Kristallstrukturen Zweikomponentiger Phasen. Berlin, Springer Verlag, 1964 (Рус. перевод: Шуберт К. Кристаллические структуры двухкомпонентных фаз. Пер. с нем. М.: Металлургия, 1964. 468 с.)
- 15 Fornasini M.L., Pani M. Ba<sub>5</sub>Ga<sub>6</sub>: a phase with octahedral clusters of gallium//Journal of Alloys and Compounds.- 1994.-V.205.-P. 179-181.
- 16 Талис А.Л. , Крапошин В.С. Возможности обобщенной кристаллографии: описание полиморфных превращений и новых дефектов в структуре алмаза// Изв. вузов. Материалы электронной техники.-2006.-№2.-С.45-53.

## **New mechanism of carbon dissolution in the lattice of the austenite while carburizing steel and its properties when the austenite goes through pearlite and martensitic transformation**

**77-30569/262290**

**# 11, November 2011**

**Kraposhin V.S.**

Bauman Moscow State Technical University

[kraposhin@gmail.com](mailto:kraposhin@gmail.com)

A new model of carbon placement in the lattice of the austenite was proposed; it is based on the equality of diamond's and austenite's lattice periods. Carbon dissolves in austenite as a centered tetrahedron which is a fragment of diamond structure. Vertexes of carbon tetrahedron are placed in the austenite lattice sites, this way the fifth atom of carbon is in the center of carbon tetrahedron, without causing distortion in the austenite lattice. This model was proved with experimental data of nuclear gamma-ray spectroscopy and is consistent with the proposed single model of pearlite and martensitic austenite transformation as multi-doubling of austenite density.

---

Publications with keywords: [austenite](#), [carbon solution](#), [martensite](#), [pearlite](#), [twinning](#), [diamond](#)

Publications with words: [austenite](#), [carbon solution](#), [martensite](#), [pearlite](#), [twinning](#), [diamond](#)

---

### Reference

1. Kraposhin V.S., Pankova M.N., Talis A.L., Freiman Yu.A., An application of a polytope (4D-polyhedron) concept for the description of polymorphic transitions: iron martensite and solid oxygen, J.Phys. IY France 112 (2003) 119-122.
2. Kraposhin V.S., Talis A.L., Wang Y.J., Description of polymorphic transformations of Ti and Zr in the framework of the algebraic geometry, Materials Science and Engineering A.438-440 (2006) 85-89.
3. Kraposhin V.S., Sil'chenkov A.D., Problemy chernoj metallurgii i metallovedeniya 2 (2009) 55-64.

4. Kurdjumov V.G., Utevskij L.M., Jentin R.I., Transformation in iron and steel, Moscow, Nauka, 1977, 236 p.
5. Zalkin V.M., The nature of the eutectic alloys and the effect of contact melting, Moscow, Metallurgija, 1987, 152 p.
6. Zalkin V.M., Kraposhin V.S., Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov 4 (2010) 15-18.
7. Kraposhin V.S., Shakhlevich K.V., Izv. AN SSSR. Metally 5 (1989) 107-112.
8. Kraposhin V. S. Supersaturated solid solutions of carbon in Fe, Co, and Ni: correlation with carbide stability, International Journal of Non-Equilibrium Processing 10 (1998) 333-338.
9. Aronin A.S., Kraposhin V.S., Shahlevich K.V., Metallofizika 12 (4) (1990) 96-101.
10. Fasiska E. J., Jeffrey G. A., On the cementite structure, Acta Crystallografica 19 (1965) 463-471.
11. Kraposhin V.S., Talis A.L., Samoylovitch M.I., Axial (helical) substructures determined by the root lattice E8 as generating clusters of the condensed phases, Journal of Non-Crystalline Solids 353 (2007) 3279-3284.
12. Gavriljuk V.G., Carbon and nitrogen in iron-based austenite and martensite: An attempt at comparative analysis, J. Phys. IV France 112 (2003) 51-59.
13. Mogutnov B.M., Tomilin I.A., Shvartsman L.A., Thermodynamics of iron-carbon alloys, Moscow, Metallurgija, 1972, 328 p.
14. Schubert K., Kristallstrukturen Zweikomponentiger Phasen, Berlin, SpringerVerlag, 1964, 468 p.
15. Fornasini M.L., Pani M., Ba<sub>5</sub>Ga<sub>6</sub>: a phase with octahedral clusters of gallium, Journal of Alloys and Compounds 205 (1994) 179-181.
16. Talis A.L., Kraposhin V.S., Izv. vuzov. Materialy jelektronnoj tehniki 2 (2006) 45-53.