

**ОБЗОРЫ**

УДК 669.017.3

**Проблемы зарождения при мартенситном превращении в стали<sup>1</sup>****В. Н. Пустовойт, Ю. В. Долгачёв**

(Донской государственный технический университет)

Главная цель данного обзора исследований, посвящённых мартенситным превращениям, — прояснение механизма зарождения мартенсита в железоуглеродистых сталях на основе сформировавшихся на данный момент представлений. Мартенситное превращение — один из основных типов фазовых превращений в твёрдом состоянии, наблюдающихся в веществах с различной природой. Необходимость тщательного и всестороннего анализа структурных состояний, формирующихся при закалке стали, обусловлена его научным и прикладным значением. В работе представлены и критически обсуждаются модели мартенситного превращения. Отмечены особенности превращения, присущие образованию зародышей мартенсита в стали. Приведены конкретные модели реконструкций кристаллических решёток. Рассматривается энергетическая модель безбарьерного зарождения мартенсита. В результате анализа пространственных конфигураций, образованных мартенситными пластинами, делается вывод: они определяются, скорее, общими закономерностями роста кристаллов, чем взаимодействием упругих полей сталкивающихся пластин. Отмечается некорректность обобщения и проецирования на стали результатов, полученных на цветных и довольно экзотических модельных сплавах. Сделан вывод, что механизм зарождения мартенсита в железоуглеродистой стали до сих пор окончательно не раскрыт.

**Ключевые слова:** мартенсит, мартенситное превращение, зародыш, кристалл, закалка, сталь.

**Введение.** Систематические исследования мартенситных превращений железоуглеродистых сплавов в России начались более 80 лет назад. Успехи в этой области связаны с именами выдающихся учёных Г. В. Курдюмова [1—6] и А. П. Гуляева [7—16]. Как известно, многие технологические схемы термической обработки включают методы закалки, приводящие к образованию мартенситных структур. Поэтому изучение механизма и кинетики образования мартенсита представляет не только теоретический, но и значительный практический интерес. Применение различных видов рентгеноструктурного анализа и методов электронной микроскопии способствовало глубокому пониманию атомного механизма перестройки кристаллической решётки. Казалось, что основные аспекты проблемы практически решены. Однако исследования последних лет показали неполноту и в некоторых случаях ошибочность сформировавшихся представлений. Например, заметно расширился круг сплавов, в которых обнаружены превращения мартенситного типа. Установлено, что в ряде случаев реализуются сложные схемы метастабильных переходов — как при охлаждении, так и при нагреве сплавов. Открывшиеся факты вызвали повышенный интерес исследователей во всём мире. Раньше утверждалось, что мартенситные превращения — это относительно узкая область изучения твёрдого тела. Рассматривались только специфические структуры, образующиеся при закалке сталей. В настоящее время можно с уверенностью констатировать, что речь идёт о широком диапазоне явлений, обнаруживаемых как в металлических, так и неметаллических объектах.

<sup>1</sup> Работа выполнена по теме 2.14.13 темплана ДГТУ, проводимого в рамках госзадания Минобрнауки России в 2012–2014 гг.

Цель данного обзора — анализ работ, посвящённых таким аспектам мартенситного превращения, как: структурный механизм мартенситных превращений, предмартенситное состояние, нестабильность решётки, термодинамика.

Мартенситное превращение в твёрдом теле как процесс структурной перестройки решётки отличается кооперативным характером, указывающим на существование управляющего перестройкой механизма. Среди мартенситных превращений роль своеобразного «предельного случая» играет  $\gamma \rightarrow \alpha$  (ГЦК  $\rightarrow$  ОЦК) превращение в сплавах на основе железа. Это превращение является реконструктивным и обладает ярко выраженными свойствами фазового перехода первого рода. Наибольший объём экспериментальных данных относится к  $\gamma \rightarrow \alpha$  мартенситному превращению. На основе этой информации сформированы понятийная база и методология исследования мартенситных превращений. Тем не менее далеко не на все вопросы, связанные с протеканием  $\gamma \rightarrow \alpha$  мартенситного превращения (как и с мартенситным превращением в других системах), есть детальные ответы. Задача обзора — получить представление о том, в каком состоянии находится именно физическое описание природы мартенситного превращения, и на основе этого сформулировать перспективы дальнейших исследований.

**Основная часть.** В большей части работ, посвящённых мартенситным превращениям, исследуются особенности кинетики растущих кристаллов мартенсита и влияние на неё различных факторов. Собственно механизм превращения практически не затрагивается. В. С. Крапошин [17] отмечает, что мартенситное превращение (превращение гранецентрированной кубической решётки аустенита в объёмно-центрированную кубическую решётку феррита) рассматривается лишь в двух работах. Так, в статье Бэйна [18] предложена схема деформации вдоль одного из рёбер куба гранецентрированной решётки, переводящей её в объёмно-центрированную («бэйновская деформация», рис. 1). Курдюмов описывает простейшую схему сдвига в плотно упакованной плоскости ГЦК-решётки, переводящего её в ОЦК-решётку [1] (рис. 2). Современные работы, посвящённые кристаллографическим теориям мартенситного превращения [19], по сути, сводятся к предложению дополнительных сдвигов к бэйновской деформации или к схеме сдвига Курдюмова — Закса. Предлагаемые в теоретических работах дополнительные сдвиги могут быть весьма сложными, включающими иногда некую «скрытую» деформацию [2]. Все эти сложности объясняются необходимостью согласования с экспериментальными данными, т. к. схема Бэйна противоречит экспериментально наблюдаемым кристалло-геометрическим характеристикам мартенситного превращения в сплавах на основе железа — ориентационным соотношениям и габитусным плоскостям. В большинстве теоретических работ анализируется не превращение решёток, а рост образовавшихся кристаллов мартенсита и влияние напряжений на их рост.

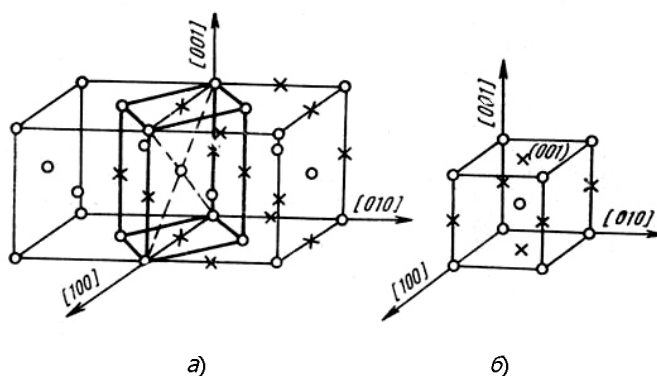


Рис. 1. Деформация Бэйна, превращающая решётку аустенита (а) в решётку мартенсита (б) [18]

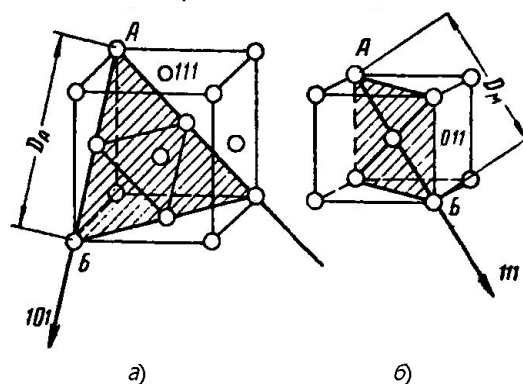


Рис. 2. Схема мартенситного превращения по Курдюмову и Заксу [1]: аустенит (а), мартенсит (б)

Пищу для размышлений дают представления А. П. Гуляева о механизме зарождения мартенсита [15]. По Гуляеву, зародыши мартенсита возникают на готовой подкладке, которой становится плоскость сдвига в момент её образования. Не все плоскости сдвига могут являться очагом мартенситной кристаллизации. Для этого должна возникнуть достаточная энергия для  $\gamma \rightarrow \alpha$  перестройки. Или же плоскость должна быть так ориентирована в аустените, чтобы образующийся мартенсит мог иметь когерентную связь с исходной фазой. Двумерный зародыш растёт по обе стороны от плоскости на небольшую толщину, что в результате даёт пластинчатый кристалл мартенсита. Рост прекращается по достижении кристаллом некоторой толщины и длины. Ещё один важный вывод, основанный на анализе экспериментов с изолированными монокристаллическими зёрнами аустенита [10]: для мартенситного превращения необходимы напряжения и не требуется тепловое движение. Это противоречит «тепловой» теории мартенситного превращения Г. В. Курдюмова и его последователей [4, 5, 6 и др.]. Температуре отводится косвенная роль. Она изменяет энергетическое состояние фаз и свойства аустенита. Кроме того, изменение температуры вызывает напряжения. Роль температуры при превращении велика, но это влияние не обусловлено только простым изменением тепловой подвижности атомов.

А. П. Гуляев отмечает интересный факт [11]: хотя удельный объём аустенита к моменту начала превращения не является величиной постоянной, но начало превращения аустенита в мартенсит происходит при достижении некоторой постоянной разницы в удельных объёмах  $0,0044 \pm 0,0002 \text{ см}^3$ . Это соответствует разности диагоналей плоскостей  $(101)_\gamma$  и  $(111)_\alpha = 0,079 \pm 0,04 \text{ \AA}$  (рис. 3) Этот результат находится в соответствии с представлениями В. И. Архарова [20] о кристаллографических соотношениях и размерах  $\gamma$ - и  $\alpha$ -решёток при мартенситном превращении.

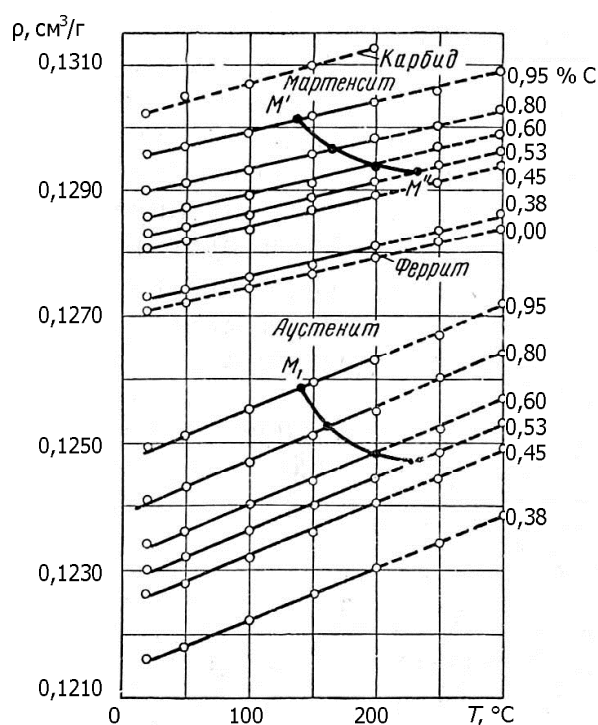


Рис. 3. Зависимость удельного объема фазы от температуры для стали с разным содержанием углерода. Сталь содержит 1,4 % Cr [11]. Пунктирной линией показан удельный объем фазы к моменту начала мартенситного превращения

Заслуживают внимания работы В. С. Крапошина и его соавторов [17, 21–31], посвящённые рассмотрению существующих противоречий современных теорий мартенситного превращения. Здесь предлагаются альтернативные модели образования мартенсита, основанные на рекон-

струкции координационных полиэдров. Используя алгебраическую геометрию, В. С. Крапошин выдвигает политопную концепцию описания экспериментально наблюдаемых структур различных фаз. Они трактуются как подструктуры (фрагменты) четырёхмерных полиэдров (политопов), спроецированных в трёхмерное пространство [21]. Политопная концепция позволяет описать полиморфные превращения как взаимные превращения координационных полиэдров превращающихся фаз. При этом кубооктаэдр ГЦК-структуры реконструируется в икосаэдр (рис. 4), а ромбододекаэдр ОЦК-структуры реконструируется в полиэдр Франка — Каспера с 14 вершинами. При описании превращения ГЦК→ОЦК в рамках предложенного подхода оказалось, что все наблюдаемые габитусы мартенсита в сплавах на основе железа являются индексами граней полиэдра Франка — Каспера с 14 вершинами. Своей осью симметрии 6-го порядка он ориентирован вдоль  $\langle 111 \rangle$  исходного гранецентрированного куба [22—24]. Найденные возможные схемы реконструкции кристаллических структур в системе железо — углерод [17] не предполагают сдвига по инвариантной плоскости и трактуют эти превращения как кооперативные и бездиффузионные.

Представленная модель превращения ГЦК→ОЦК развивается в последующих работах автора [25] с учётом поведения атомов углерода. Согласно новой модели, углерод растворяется в аустените в виде центрального тетраэдра, представляющего собой фрагмент структуры алмаза. Вершины углеродного тетраэдра размещаются в узлах решётки аустенита. Пятый атом углерода оказывается в центре углеродного тетраэдра (рис. 5), не вызывая искажений решётки аустенита. Такое размещение углерода основано на малой разности периодов решёток аустенита и алмаза (1,2 пм при комнатной температуре). Модель подтверждается данными ядерной гамма-спектроскопии, указывающей на присутствие «гантелей» атомов углерода, ориентированных вдоль  $\langle 110 \rangle$  аустенита. Роль углерода при перлитном и мартенситном превращениях сводится к стабилизации призматической конфигурации атомов железа, благодаря чему из аустенита выделяется цементит (рис. 6), а полиморфное превращение в железе выполняется образованием полисинтетических двойников в ГЦК-решётке и их раздвойникованием в ОЦК-структуру. Стабилизированные призмы микродвойников порождают цементитные пластины при перлитном превращении и мидриб внутри мартенситных пластин при мартенситном превращении.

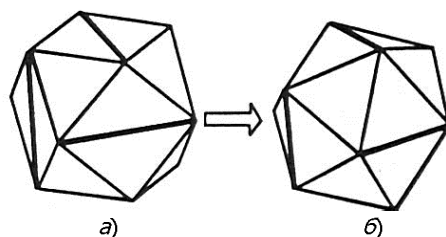


Рис. 4. Реконструкция первой координационной сферы ГЦК-решётки: кубооктаэдра (а) в икосаэдр (б) [17]

Теоретическому изучению структурного превращения мартенситного типа и предпереходного состояния, вызванного изменением температуры и внешней механической силы, посвящены работы Е. Е. Слядникова [32—35]. Для теоретического описания предпереходного состояния одновременно учитываются как конфигурационная, так и механическая (фононная) неустойчивость кристалла [33]. Разработка микроскопической теории структурных фазовых переходов мартенситного типа ещё далека от своего завершения [36, 37]. Поэтому для описания превращения мартенситного типа и предпереходного состояния используется микроскопическая модель [33—35], в которой решётка структурно неустойчивого кристалла рассматривается как двухуровневая квантовая система (система псевдоспинов).

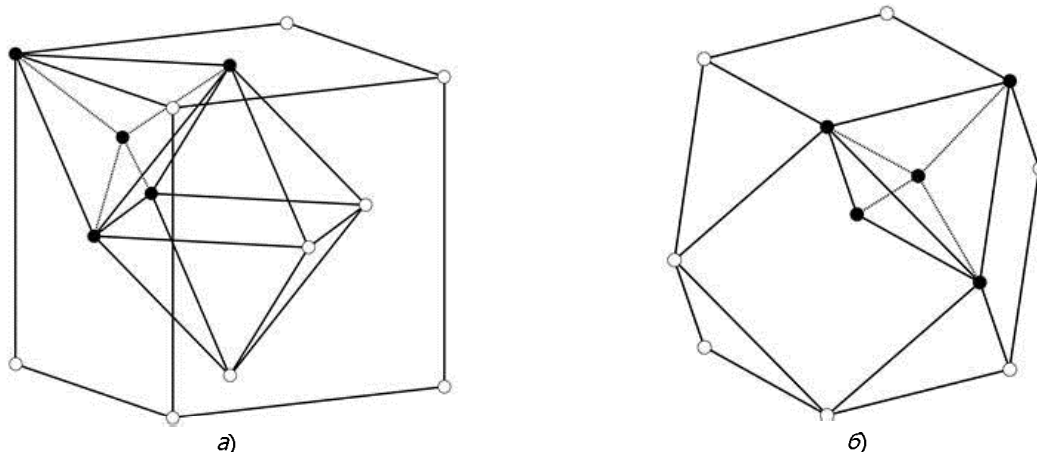


Рис. 5. Размещение алмазного центрированного тетраэдра углерода (чёрные кружки) в элементарной ГЦК-ячейке аустенита (а) и в первой координационной сфере ГЦК-ячейки — кубооктаэдре (б) [25]

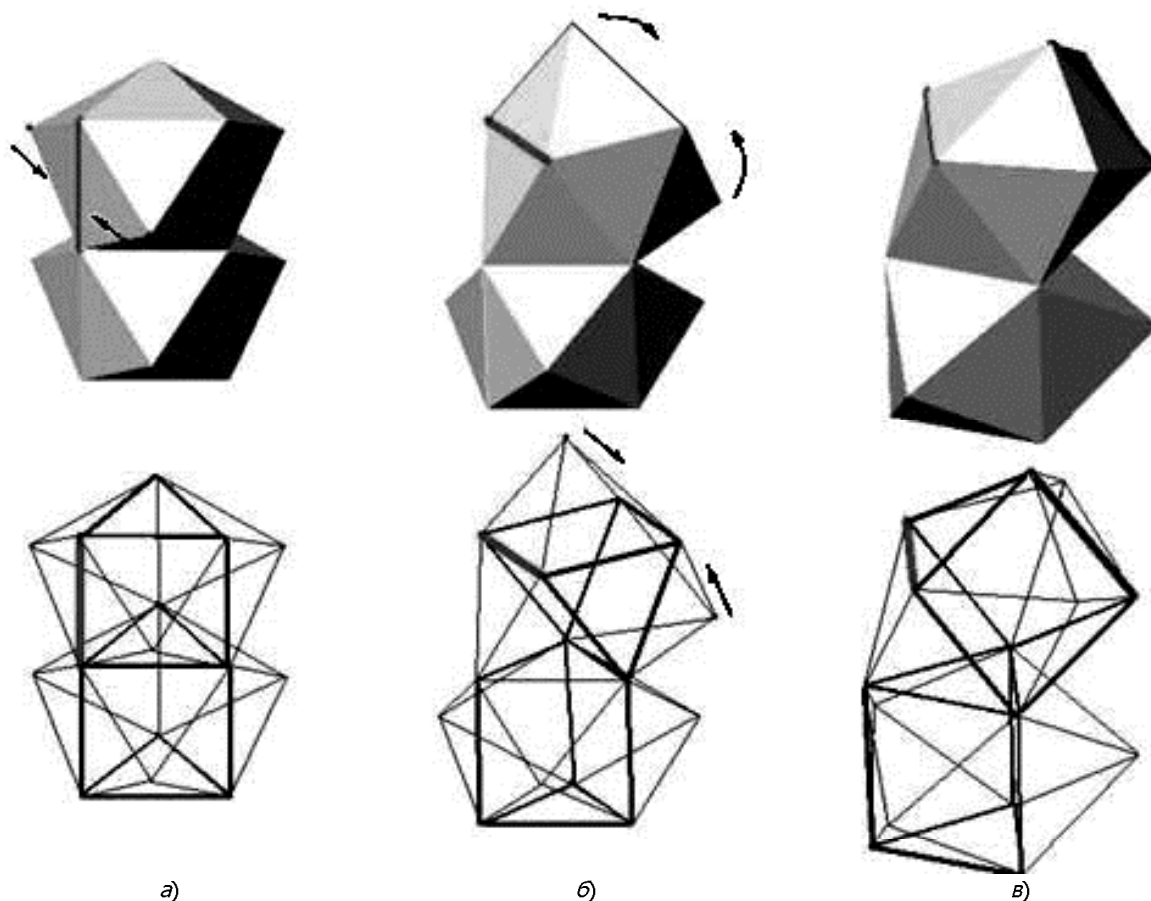


Рис. 6. Переброска рёбер в двойнике (а) переводит его через промежуточную конфигурацию (б) в структуру цементита (в) [25]

Работы изобилуют довольно сложными математическими выкладками. До конца понять суть описываемых операций авторам этой обзорной статьи, к сожалению, не удалось. Недоступность для широкого круга читателей можно считать одним из минусов подобных исследований. Однако выводы работы [32] представляют интерес в свете уже рассмотренного подхода к образованию мартенсита, основанного на реконструкции координационных полиэдров. По мнению автора [32], превращение мартенситного типа представляет собой структурный переход, который можно описать как два последовательно протекающих структурных превращения. Первое: исход-

ная структура — предпереходное состояние. Второе: предпереходное состояние — конечная структура. Для превращения, близкого ко второму роду (что характерно для многих структурных переходов мартенситного типа), эти два последовательных превращения можно считать непрерывными. Таким образом подтверждается представление о том, что превращение должно происходить через промежуточную фазу, или прафазу. Представленный порядок превращения очень точно ложится на предложенную в [22] схему реконструкции решётки при полиморфном переходе: ГЦК → A15 (промежуточная атомная конфигурация) → ОЦК. В [32] указывается на необходимость учитывать квантовые конфигурационные степени свободы решётки при описании мартенситных превращений в области низких температур (менее 100 К), т. к. при данных температурах механизм квантового туннелирования атома более существенен, чем механизм теплового пере-скока. В условиях низких температур эффект квантового туннелирования атомов является причиной когерентного поведения кристалла при экспериментально наблюдаемом превращении: исходная структура — предпереходное состояние — конечная структура. Это превращение инициируется как изменением температуры, так и нагрузкой [36, 38—40]. Вызванная квантовым туннелированием существенная делокализация волновой функции атома позволяет рассматривать предпереходное состояние в кристалле как «суперпозицию» исходной и конечной структур.

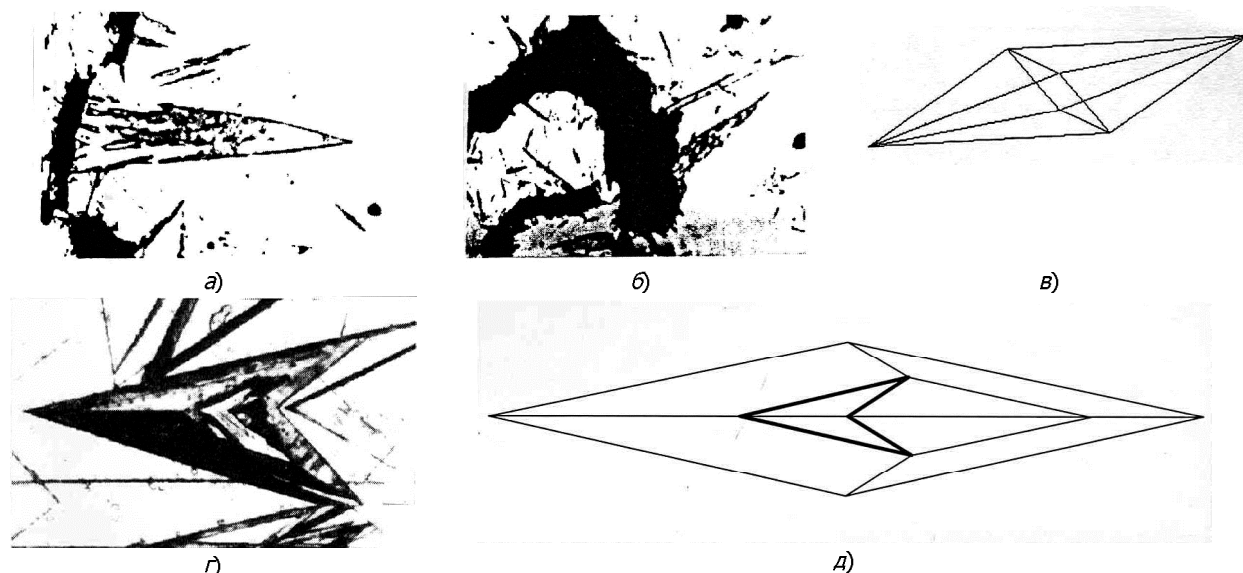


Рис. 7. Группировки мартенситных пластин, представляющие собой замкнутую ромбическую дипирамиду: структура закалённой Fe-1,6 % С порошковой спечённой стали пористостью 30 % ( $\times 1350$ ) (а, б) [41]; геометрическая модель объединения ориентационных вариантов мартенситных пластин в ромбическую дипирамиду — габитусную пирамиду (габитус пластин соответствует плоскости общего положения  $\{hkl\}$ ) (в) [26]; вариант сечения пирамидальных групп мартенситных пластин (на схеме линии пересечения граней пирамиды с плоскостью шлифа показаны утолщёнными) (г, д); микрофотография сечения ( $\times 400$ ) (г); схема сечения (д) [26]

Интересные результаты получены В. А. Блиновским при изучении мартенситного превращения в порошковых спечённых сталях (ПСС) [41]. Металлографическое исследование поверхности образцов с содержанием углерода 1,6 %, закалённых от температур выше  $A_{с7}$ , показало преимущественный рост мартенситных пластин от пор вглубь аустенитной матрицы. Образовавшиеся от поверхности пор пластины зачастую имеют в сечении форму, близкую к ромбу. Отдельные развивающиеся от пор мартенситные пластины достигают размера 50 мкм (рис. 7 а, б). При этом кристаллы имеют характерную морфологию, присущую высокоуглеродистому двойникованному мартенситу. Таким образом подтверждается предложенный в [26] вариант группировки мартенситных пластин. Это замкнутая ромбическая дипирамида, ограниченная восемью однотипными га-

битусными плоскостями, объединёнными вокруг одного общего направления (рис. 7 в, г, д). Обнаружение сечений группировок пластин, которые легко интерпретируются как сечения габитусной дипирамиды плоскостью металлографического шлифа (и в пористых, и сплошных сплавах), согласуется со следующей точкой зрения: пространственные конфигурации, образованные мартенситными пластинами, определяются, скорее, общими закономерностями роста кристаллов, чем взаимодействием упругих полей сталкивающихся пластин.

Ещё больший интерес представляют рассуждения в [41] о безбарьерной модели зарождения мартенсита. Согласно классической модели барьерного зарождения [42], способной к необратимому росту считается пластина мартенсита, достигшая критического размера  $r^*$ . Процесс её создания в значительной степени связан с возникновением и изменением границы между аустенитом и мартенситом (т. е. с образованием поверхности раздела аустенита — мартенсита по Кнаппу и Делингеру). В итоге образование зародыша по Кауфману и Коэну [42] заключается в том, что «разделённые дислокации имеют тенденцию выстраиваться в ряды, а другие стремятся присоединиться к уже существующему ряду, пока не будет достигнут оптимальный размер, отвечающий данной температуре». Но использование такой модели зарождения не может объяснить некоторых особенностей мартенситного превращения, наблюдаемых, например, в порошковых спечённых сталях [41]. Некоторые исследователи [43, 44] склоняются к принятию модели безбарьерного зарождения мартенсита. Эта модель предполагает, что при температуре  $M_s$  образование микрообъёма мартенсита любого размера сопровождается понижением свободной энергии системы. Созданию таких микрообъёмов мартенсита способствуют: скопления дислокаций перед препятствием в плоскости скольжения [44, 45]; единичные дислокационные петли соответствующего размера и ориентации [43, 44]; дефекты упаковки, образованные диссоциированными дислокациями [46]; дислокационные стенки [44]. Кроме того, развитие мартенситного превращения стимулируется приложением к поверхности материала нормальной нагрузки (контакт Герца) [44], что связано с увеличением плотности дислокаций. Повышение температуры  $M_s$  в Fe-Ni-C сплаве, вызванное увеличением плотности дислокаций от  $10^6$  до  $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , наблюдалось в [47].

В качестве метода теоретической оценки развития мартенситного превращения в [41] использовано сочетание «классической» теории и теории безбарьерного зарождения, к принятию которой склоняют данные исследований [43, 44]. Это обусловлено тем, что «классический» подход к проблеме зарождения мартенсита может оказаться полезным в рамках современных представлений о безбарьерном процессе. Действительно, из-за наличия указанных ранее дефектов кристаллического строения образование предмартенситной структуры в некоторых объёмах аустенита при превращении в мартенсит сопровождается снижением до определённой величины энергии системы. Таким образом покрывается «классический» барьер зарождения. После преодоления этого барьера с необратимым ростом пластины мартенсита энергия системы будет понижаться вне зависимости от существования рассматриваемых дефектов. Итак, температура начала мартенситного превращения будет определяться величиной «барьера», описанного в «классической» модели. Такой же будет и величина возможного понижения (за счёт дефектов) энергии системы в области размеров меньше «классического» критического размера кристалла  $r^*$  (рис. 8). Выполненный в [41] анализ показал, что для пористых порошковых спечённых сталей ведущим неустраняемым фактором, определяющим развитие мартенситного превращения, является релаксация напряжений на свободной поверхности пор. Экспериментально наблюдаемое повышение температуры  $M_s$  для ПСС с содержанием углерода 0,4—1,2 % и пористостью 30 % составляет порядка 100 °C [48—50], что хорошо согласуется с полученными результатами в рамках рассмотренной модели (~90 °C).

Из современных трудов можно отметить работы М. П. Кащенко и сотрудников [51—55]. В данных исследованиях мартенситное превращение рассматривается в рамках динамической тео-

рии, основным элементом которой является управляющий волновой процесс (УВП). Рост кристаллов осуществляется за счёт распространения управляющего процесса, несущего локализованную в области волнового фронта пороговую деформацию (рис. 9). В этом случае, как заявлено в [52—54], неравновесная электронная подсистема в области волнового фронта при определённых условиях способна генерировать бегущие волны смещений, поддерживая УВП. Следовательно, речь идёт о «жёстких» модах.

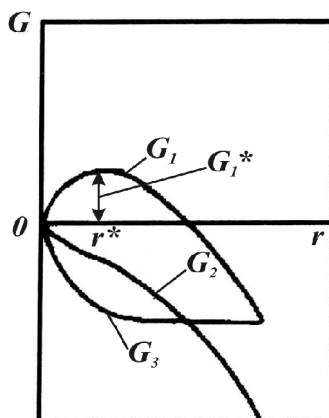


Рис. 8. Зависимость свободной энергии системы, обусловленной взаимодействием дефектов с пластиной мартенсита, от размера пластины  $r$  при гомогенном  $G_1$ , гетерогенном  $G_2$  зарождении и составляющей свободной энергии  $G_3$  [44]

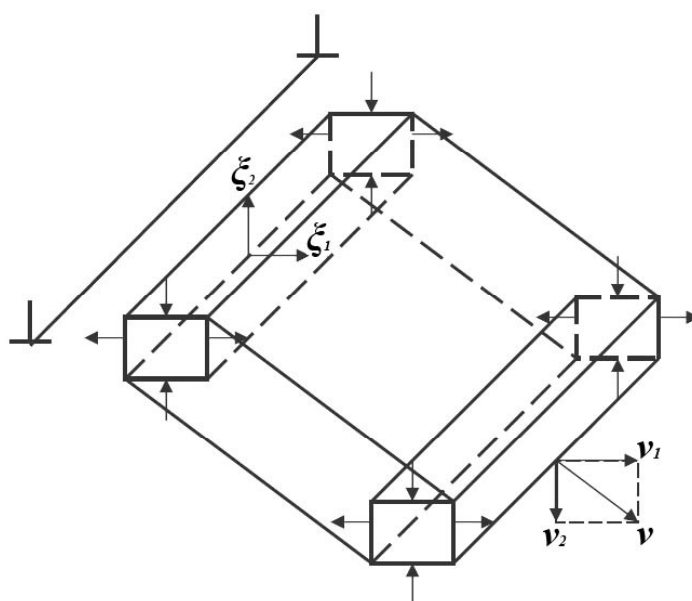


Рис. 9. Волновая модель управления ростом мартенситного кристалла [51]

На основе этих теоретических представлений авторами получены различные зависимости и формулы, например:

- зависимость температуры  $M_H$  от размера зерна;
- формула для критического размера зерна;
- алгоритм оценки доли мартенсита при атермической макрокинетики;
- влияние магнитного поля на снижение критического размера зерна, снятие стабилизации аустенита и повышение  $M_H$ ;
- возможность протекания бездиффузионной перестройки в нанокристаллическом состоянии;

— особенности формирования кристаллов мартенсита деформации с использованием кристонного подхода [55].

Стоит отметить, что, хотя подобный подход и помогает математически вывести зависимости, совпадающие (при определённых условиях) с экспериментальными данными, он не даёт полноценного понимания происходящих перестроений кристаллической решётки при мартенситном превращении. Волновые законы позволяют хорошо описать процессы распространения напряжений при мартенситном превращении, но сути самого превращения не раскрывают. Это признают и сами авторы [51], говоря о том, что УВП, задавая макроскопические морфологические признаки превращения, не предопределяет конечных положений всех атомов. Смещения атомов к новым положениям равновесия могут дополнительно инициироваться более коротковолновыми смещениями в предпереходном состоянии, на стадиях роста и аккомодации сосуществующих фаз. В то же время характерные для наномасштаба черты кристаллодинамики, обусловленные коротковолновыми смещениями, отвечают и за формирование тонкой внутренней двойниковой структуры кристаллов, и за спектр перетасовочных смещений (они меняют последовательность чередования наиболее плотно упакованных кристаллических плоскостей, а значит, и симметрию кристаллической решётки).

Как видно, вопрос о зарождении кристаллов мартенсита окончательно не решён. Большинство исследователей считают, что происходит гетерогенное зарождение мартенсита. Предполагается, что местами предпочтительного зарождения мартенсита могут быть дислокации, дефекты упаковки, границы зёрен и другие структурные дефекты. Упругие напряжения дефектов способствуют зарождению кристаллов мартенсита. Кроме того, дислокации могут служить готовой поверхностью раздела образующегося кристалла.

Многokrатно анализировалось зарождение мартенсита на отдельных дислокациях, дефектах упаковки, петлях дислокаций и различных дислокационных ансамблях [56—61]. Однако экспериментально влияние дислокаций на зарождение мартенсита не зафиксировано [62]. В связи с этим нельзя было обойти вниманием работу В. А. Позднякова [63], посвящённую вопросам механизмов зарождения мартенсита на границе зёрен. Ещё в [62, 64—65] была показана возможность облегчённого образования мартенсита на границах зёрен. В [63] произведён анализ двух возможных механизмов зарождения кристаллов мартенсита на границах зёрен в системах без смягчения модулей упругости — например, в сплавах на основе железа.

Проведённые термодинамические расчёты гомогенного зарождения кристаллов мартенсита показали невозможность термофлуктуационного зарождения для сплавов на основе железа. Изучена термодинамика самоаккомодационного зарождения мартенсита на границах зёрен (рис. 10), видимо подобный аккомодационный эффект реализуется также при образовании ферм кристаллов мартенсита. Исследована термодинамика зарождения мартенсита на неравновесных границах и их стыках с дисклинационными полями напряжений.

Как известно, эффективным методом повышения дисперсности структуры является интенсивная пластическая деформация. При интенсивной пластической деформации образуется фрагментированная структура. В формирующейся структуре на границах зёрен и фрагментов распределены нескомпенсированные дислокации, а в стыках зёрен находятся стыковые дисклинации. Анализ условий зарождения мартенсита на дисклинации или дисклинационном диполе (рис. 11) был проведён с помощью известной модели образования зародыша мартенсита при расщеплении конечной стенки дислокации [56], расчёта условий образования и развития зародыша мартенсита для такого механизма из [60] (а в дисклинационном описании — из [66]). Анализ показал, что эффективная движущая сила превращения вблизи дисклинационного диполя для сплавов Fe-Ni возрастает в 2—3 раза, и потенциальный барьер зарождения уменьшается в 4—9 раз. Таким образом, температура начала мартенситного превращения  $M_n$  вблизи неравновесных границ зёрен и

нескомпенсированных стыков может быть значительно выше среднего объёмного значения. Для самоаккомодационного зарождения мартенсита на границе зерна должны быть выполнены одновременно два условия: деформация превращения с инвариантной плоскостью для обоих кристаллов и достаточная отрицательная величина энергии взаимодействия этих кристаллов мартенсита.

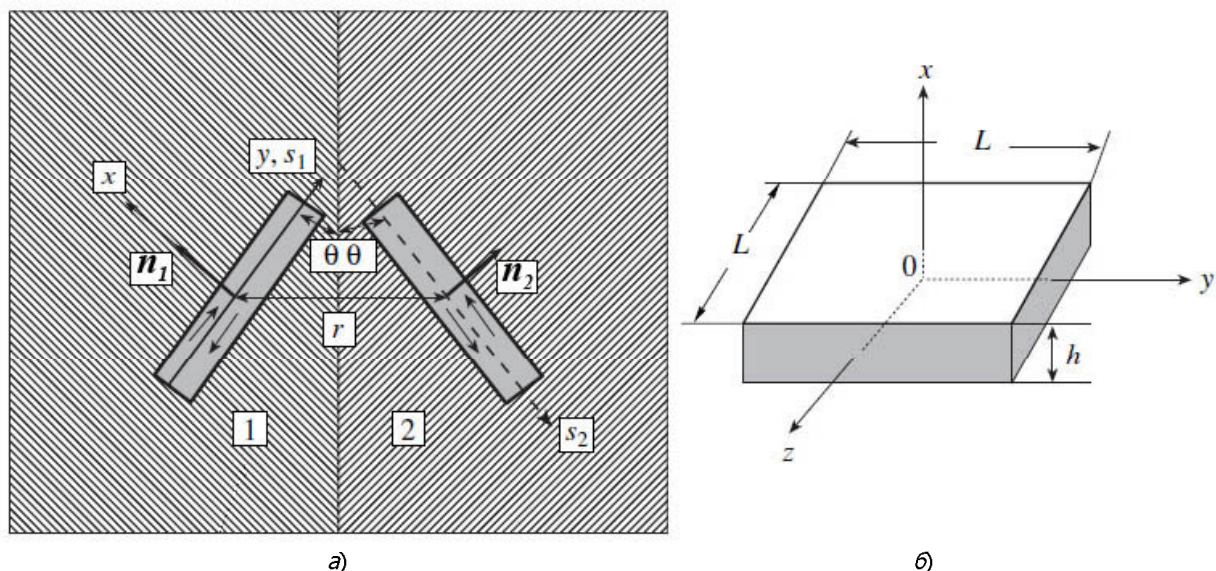


Рис. 10. Самоаккомодационное зарождение кристаллов мартенсита пластинчатой формы на границе зерна (а) и размеры кристаллов (б) [63]

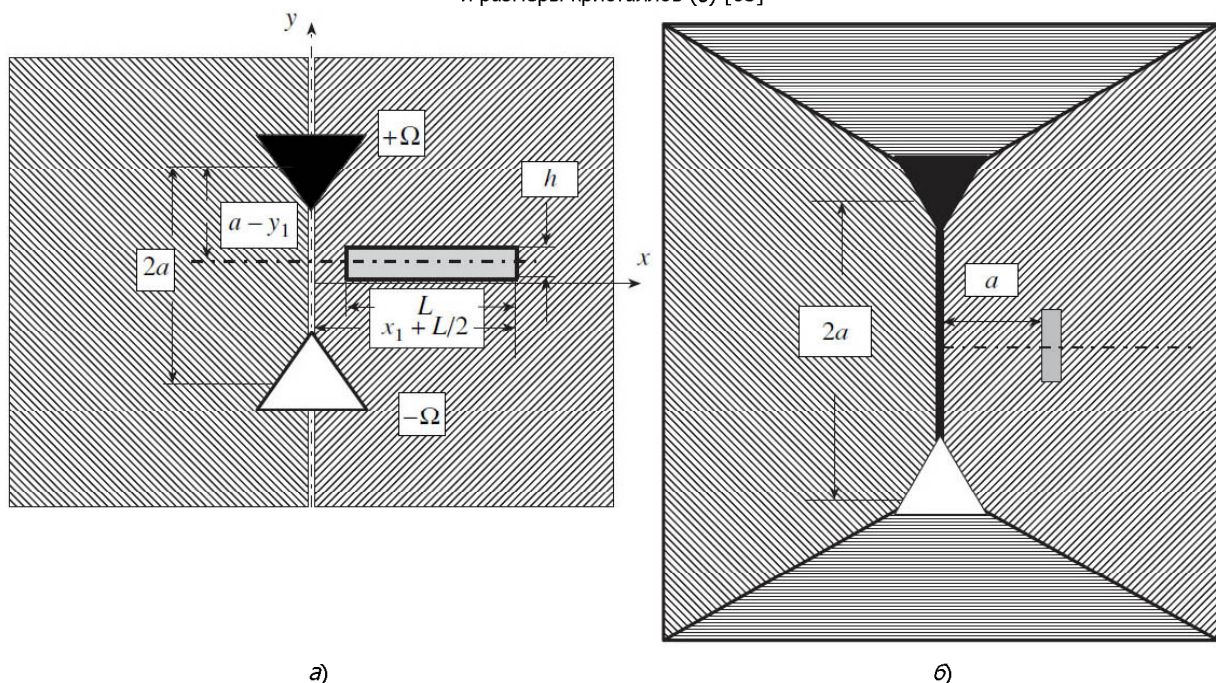


Рис. 11. Зарождение пластинчатого кристалла мартенсита возле дисклинационного диполя: габитусная плоскость совпадает с центральной плоскостью диполя (а), габитусная плоскость параллельна плоскости диполя (б) [63]

Существенная особенность мартенситного превращения — его автокаталитичность, которая в разных сплавах выражена в различной степени. Она заключается в том, что образование первых кристаллов влечёт за собой появление новых, а те, в свою очередь, могут способствовать образованию следующих кристаллов, и т. д. Причина автокаталитичности — возникновение зна-

чительных полей упругих напряжений у краёв растущих мартенситных кристаллов. Эти упругие напряжения способствуют зарождению новых пластин, при росте которых напряжения уменьшаются. При уменьшении размера зерна (при неизменной концентрации центров зарождения мартенсита) будет достигнута такая степень дисперсности, когда вначале на одно зерно, а затем на большее их число будет приходится в среднем один образующийся кристалл мартенсита. Условие автокаталитичности мартенситного превращения будет определяться в этом случае возможностью первичных кристаллов мартенсита инициировать образование новых кристаллов в соседних зёрнах. Изучение мартенситного превращения в материале с ультрадисперсной структурой — актуальная задача. При этом важно знать условия перехода мартенситного превращения из зерна в соседние зёрна. Этому посвящена работа В. А. Позднякова [67]. В материалах с ультрадисперсной структурой поля напряжений становятся соизмеримыми с другими силовыми факторами, а распределение деформации превращения в нанокристалле мартенсита уже нельзя считать однородным. На основе проведённого в [67] анализа условий автокаталитического развития мартенситного превращения (рис. 12) получена обобщённая зависимость температуры начала мартенситного превращения от размера зерна для материалов с субмикроструктурной структурой. Сделано заключение, что существует некоторое предельное расстояние  $R_c$  на которое автокаталитически может распространяться превращение с готового центра (предзародыша). Чем меньше размер зерна  $D$ , тем меньше величина  $R_c$ , так как уменьшаются размеры образующихся мартенситных кристаллов и, соответственно, концентрация напряжений, вызываемая ими. Из-за случайного разориентирования решёток зёрен развитие мартенситного превращения по ансамблю зёрен тормозится. Когда длина автокаталитического пробега мартенсита по нескольким зёрнам  $R_c$  становится меньше среднего расстояния между готовыми центрами мартенсита, объёмная доля мартенсита начинает резко уменьшаться. Уменьшается и размер зерна аустенита. При размерах зёрен меньше некоторого критического размера  $D^*$  автокаталитический эффект превращения будет подавлен и развитие мартенситного превращения ограничится ростом мартенситных кристаллов в зёрнах аустенита с готовыми центрами или с необходимыми условиями гетерогенного зарождения [68]. То есть существует такой размер зерна, в котором кристалл мартенсита не может развиваться даже с готового центра.

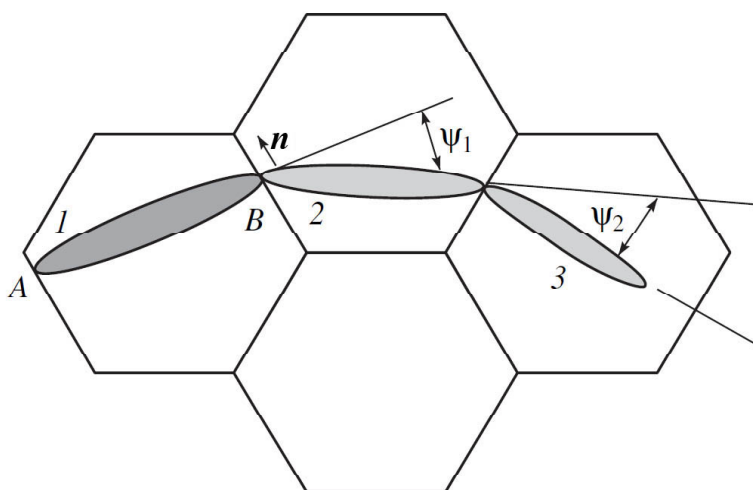


Рис. 12. Процесс автокаталитического развития мартенситного превращения в соседних зёрнах [67]

**Заключение.** В обзоре рассмотрена лишь малая часть работ, посвящённых проблеме зарождения при мартенситном превращении в стали. Имеющиеся данные [2, 69] показывают, что образующиеся мартенситные кристаллы обладают набором взаимосвязанных морфологических признаков, отражающих кооперативный характер превращения. Речь идёт о кристаллографических ори-

ентациях: габитусных плоскостях, направлениях макросдвига, решётках исходной и конечной фаз. Характерной чертой является также высокая скорость роста кристаллов. Очевидно, что теория, стремящаяся к максимальной степени полноты описания, обязана раскрыть всю совокупность наблюдаемых особенностей превращения. Обзор показал, что такой полной теории до сих пор не существует, а физическое описание природы мартенситного превращения ещё далеко от завершения.

Многие исследователи проецируют результаты, полученные при изучении цветных сплавов, в целом на мартенситные превращения. Однако ещё Г. Фишер [70, 71] отмечал, что механизм образования зародышей мартенсита в безуглеродистых сплавах железа и в цветных металлах принципиально отличен от механизма образования зародышей мартенсита в стали. Можно констатировать, что собственно механизм зарождения мартенсита в железоуглеродистой стали до сих пор окончательно не раскрыт.

Данный обзор позволяет обозначить перспективы дальнейших исследований. Для описания мартенситного превращения в стали предполагается использовать современную модель, основанную на реконструкции координационных полиэдров. При этом следует учесть роль внедрённых атомов углерода, явления сверхпластичности аустенита в температурном интервале превращения и наличие в аустените областей с ближним ферромагнитным порядком [72] (ферромагнитноупорядоченных нанокластеров). При энергетическом описании процесса превращения представляется целесообразным использование сочетания «классической» теории и теории безбарьерного зарождения. Особый интерес вызывает предположение, что в сплавах внедрения, таких как железо — углерод, зародыши предпочтительно образуются в местах, свободных от углерода. В этих областях образуются некогерентные зародыши феррита, которые впоследствии станут центрами мартенситного превращения. При построении теории будет рассмотрено влияние на протекание превращения энергии внешнего магнитного поля. Как известно, это оказывает воздействие на термодинамику, механизм, кинетику фазового перехода и позволяет получать устойчивые изменения структуры и свойств, полезных для эксплуатации.

#### **Библиографический список**

1. Kurdjumov, G. Über den Mechanismus der Stahlhärtung / G. Kurdjumov, G. Sachs // Zeitschrift für Physik. — 1930. — Bd. 64, h. 5/6. — S. 325—342.
2. Курдюмов, Г. В. Превращение в железе и стали / Г. В. Курдюмов, Л. М. Утевский, Р. И. Энтин. — Москва : Наука, 1977. — 236 с.
3. Курдюмов, Г. В. Явление закалки и отпуска стали / Г. В. Курдюмов. — Москва : Металлургиздат, 1960. — 64 с.
4. Курдюмов, Г. В. Бездиффузионные (мартенситные) превращения в сплавах / Г. В. Курдюмов // Журнал технической физики. — 1948. — Т. 18, № 8. — С. 999—1025.
5. Курдюмов, Г. В. К теории мартенситных превращений / Г. В. Курдюмов // Проблемы металловедения и физики металлов : сб. трудов. — Москва : Металлургиздат, 1952. — Вып. 3. — С. 9—44.
6. Курдюмов, Г. В. Превращение аустенита в мартенсит при низких температурах / Г. В. Курдюмов, О. П. Максимова // Проблемы металловедения и физики металлов : сб. трудов. — Москва : Металлургиздат, 1951. — Вып. 2. — С. 64.
7. Гуляев, А. П. Мартенситное превращение / А. П. Гуляев // Труды Научно-технического общества чёрной металлургии. — 1955. — Т. 3. — С. 57—72.
8. Гуляев, А. П. Исследование мартенситного превращения в стали / А. П. Гуляев, А. Н. Алфимов // Журнал технической физики. — 1955. — Т. 25, вып. 4. — С. 680—686.
9. Гуляев, А. П. Мартенситное превращение в железе / А. П. Гуляев, М. А. Гузовская // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1977. — № 6. — С. 2—5.

10. Гуляев, А. П. Исследование мартенситного превращения в аустенитном порошке / А. П. Гуляев, В. Д. Зеленова // Физика металлов и металловедение. — 1958. — Т. 6, вып. 5. — С. 945–946.
11. Гуляев, А. П. Диаграмма объёмного состояния фаз в стали ШХ15 / А. П. Гуляев, Б. М. Зельбет // Физика металлов и металловедение. — 1958. — Т. 6, вып. 5. — С. 843–848.
12. Гуляев, А. П. О превращении аустенита в мартенсит при температурах ниже нуля. Ч. II / А. П. Гуляев, В. Г. Воробьёв // Журнал технической физики. — 1951. — Вып. 10. — С. 1164–1169.
13. Гуляев, А. П. Металлографическое исследование превращения аустенита в мартенсит / А. П. Гуляев, Е. В. Петунина. — Москва : Машгиз, 1952. — 92 с.
14. Гуляев, А. П. Исследование превращения аустенита в мартенсит при температурах, близких к абсолютному нулю / А. П. Гуляев, И. И. Лифанов // Труды Московского вечернего машиностроительного института. — 1955. — Вып. 2. — С. 139–144.
15. Гуляев, А. П. Термическая обработка стали / А. П. Гуляев. — Москва : Машиностроение, 1960. — 496 с.
16. Гуляев, А. П. Мартенситное превращение в стали / А. П. Гуляев // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1959. — № 11. — С. 5–13.
17. Крапошин, В. С. Чем отличается мартенситное превращение от нормального? / В. С. Крапошин, А. Д. Сильченков // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2008. — № 11 (641). — С. 28–36.
18. Bain, E. C. The nature of martensite / E. C. Bain // Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers. — 1924. — V. 70. — Pp. 25–46.
19. Wayman, C.-M. Introduction to Crystallography of Martensitic Transformation / C.-M. Wayman. — New York : MacMillan, 1964. — 168 p.
20. Архаров, В. И. Кристаллография закалённой стали / В. И. Архаров. — Москва : Металлургиздат, 1951. — 144 с.
21. Крапошин, В. С. Золотое сечение в структуре металлов / В. С. Крапошин // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2005. — № 8. — С. 3–10.
22. Крапошин, В. С. Политопный топологический подход к описанию мартенситного превращения / В. С. Крапошин, А. Л. Талис, М. Н. Панкова // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1999. — № 8. — С. 23–28.
23. Kraposhin, V. S. Structural realization of the polytope approach for the geometrical description of the transition of a quasicrystal into a crystalline phase / V. S. Kraposhin, A. L. Talis, J. M. Dubois // Journal of Physics: Condensed Matter. — 2002. — V. 14. — P. 8987–8996.
24. An application of a polytope (4D-polyhedron) concept for the description of polymorphic transition: iron martensite and solid oxygen / V. S. Kraposhin [et al.] // Journal de Physique IV France. — 2003. — V. 112. — P. 119–122.
25. Крапошин, В. С. Новый механизм растворения углерода в решётке аустенита при цементации стали и его поведение при мартенситном и перлитном превращениях аустенита [Электрон. ресурс] / В. С. Крапошин // Наука и образование : электронное научно-техническое издание. — 2011. — № 11. — Режим доступа : <http://techno-new.developer.stack.net/doc/262290.html> (дата обращения: 23.12.12).
26. Панкова, М. Н. Трёхмерная модель заполнения пространства зерна мартенситными кристаллами при превращении аустенита / М. Н. Панкова, В. С. Крапошин // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1999. — № 8. — С. 28–31.

27. Kraposhin, V. S. Description of polymorphic transformation of Ti and Zr in the framework of the algebraic geometry / V. S. Kraposhin, A. L. Talis, Y. J. Wang // *Materials Science and Engineering. A. Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*. — 2006. — V. 438—440. — P. 85—89.
28. Кристаллическое строение промежуточных структур в сплавах с эффектом запоминания формы как реализация конструкций алгебраической геометрии / В. С. Крапошин [и др.] // *Металловедение и термическая обработка металлов*. — 2007. — № 7. — С. 3—9.
29. Крапошин, В. С. Структура  $\omega$ -фазы как проекция политопа  $\{3, 4, 3\}$  и промежуточная конфигурация при полиморфных превращениях в титане и цирконии / В. С. Крапошин, А. Л. Талис, В. Т. Нгуен // *Материаловедение*. — 2007. — № 8. — С. 2—9.
30. Kraposhin, V. S. Axial (helical) substructures determined by the root lattice  $E_8$  as generating clusters of the condensed phases / V. S. Kraposhin, A. L. Talis, M. I. Samoylovitch // *Journal of Non-Crystalline Solids*. — 2007. — V. 353. — P. 3279—3284.
31. Крапошин, В. С. Возможности обобщённой кристаллографии: описание полиморфных превращений и новых дефектов в структуре алмаза / В. С. Крапошин, А. Л. Талис // *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. — 2006. — № 2. — С. 45—53.
32. Слядников, Е. Е. Термодинамическая теория структурного превращения мартенситного типа / Е. Е. Слядников // *Известия Томского политехнического университета*. — 2006. — Т. 309, № 2. — С. 35—40.
33. Слядников, Е. Е. Предпереходное состояние и структурный переход в деформированном кристалле / Е. Е. Слядников // *Физика твёрдого тела*. — 2004. — Т. 46, № 6. — С. 1065—1071.
34. Слядников, Е. Е. Основное состояние в структурно неустойчивом кристалле / Е. Е. Слядников // *Известия Томского политехнического университета*. — 2005. — Т. 308, № 5. — С. 14—18.
35. Слядников, Е. Е. Гамильтониан структурно неустойчивого кристалла / Е. Е. Слядников // *Известия Томского политехнического университета*. — 2005. — Т. 308, № 6. — С. 13—17.
36. Пушин, В. Г. Предпереходные явления и мартенситные превращения / В. Г. Пушин, В. В. Кондратьев, В. Н. Хачин. — Екатеринбург : Уральское отделение РАН, 1998. — 367 с.
37. Малыгин, Г. А. Размытые мартенситные переходы и пластичность кристаллов с эффектом памяти формы / Г. А. Малыгин // *Успехи физических наук*. — 2001. — Т. 171, № 2. — С. 187—212.
38. Панин, В. Е. Структурные уровни деформации твёрдых тел / В. Е. Панин, В. А. Лихачёв, Ю. В. Гриняев. — Новосибирск : Наука, 1985. — 229 с.
39. Вонсовский, С. В. Сверхпроводимость переходных металлов, их сплавов и соединений / С. В. Вонсовский, Ю. А. Изюмов, Э. З. Курмаев. — Москва : Наука, 1977. — 383 с.
40. Упругие и акустические свойства ионных, керамических диэлектриков и высокотемпературных сверхпроводников / В. Н. Беломестных [и др.]. — Томск : STT, 2001. — 226 с.
41. Пустовойт, В. Н. Структурные и кинетические особенности мартенситного превращения в пористой высокоуглеродистой стали / В. Н. Пустовойт, Ю. Н. Чурюкин, В. А. Блиновский // *Физика металлов и металловедение*. — 1991. — № 5. — С. 78—86.
42. Кауфман, Л. Термодинамика и кинетика мартенситных превращений / Л. Кауфман, М. Коэн // *Успехи физики металлов*. — 1961. — № 4. — С. 192—290.
43. Easterling, K. The nucleation of martensite in steel / K. Easterling, A.-R. Tholen // *Acta Metallurgica*. — 1976. — V. 24, № 4. — Pp. 333—341.
44. Chen, I.-W. Theory and experiment of martensitic nucleations in  $ZrO_2$  containing ceramics and ferrous alloys / I.-W. Chen, Y.-H. Chiao // *Acta Metallurgica*. — 1985. — V. 33, № 10. — Pp. 1827—1847.
45. Sucuki, T. An experimental study of martensite nucleation and growth in 1818 stainless steel / T. Sucuki, H. Kojima, K. Sucuki // *Acta Metallurgica*. — 1977. — V. 25, № 7. — Pp. 1151—1162.

46. Brooks, E.-P. In situ observation of the formation of martensite in stainless steel / E.-P. Brooks, M.-N. Loretto, R.-E. Smallman // *Acta Metallurgica*. — 1979. — V. 27, № 12. — Pp. 1829–1838.
47. Haycelden, C. The martensite transformation in Fe-Ni-C alloys / C. Haycelden, B. Cantor // *Acta Metallurgica*. — 1986. — V. 34, № 2. — Pp. 233–242.
48. Ермаков, С. С. Металлокерамические детали в машиностроении / С. С. Ермаков, Н. Ф. Вязников. — Ленинград : Машиностроение, 1975. — 232 с.
49. Ермаков, С. С. Термическая обработка порошковых стальных деталей / С. С. Ермаков. — Ленинград : ЛДНТП, 1981. — 24 с.
50. Ермаков, С. С. Порошковые стали и изделия / С. С. Ермаков, Н. Ф. Вязников. — Ленинград : Машиностроение, 1990. — 319 с.
51. Кащенко, М. П. Динамическая теория  $\gamma$ - $\alpha$  мартенситного превращения в сплавах железа и решение проблемы критического размера зерна / М. П. Кащенко, В. Г. Чащина. — Москва : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; Ижевск : Ижевский институт компьютерных исследований, 2010. — 132 с.
52. Кащенко, М. П. Лазерная модель мартенситного превращения в сплавах переходных металлов / М. П. Кащенко // Мартенситные превращения в металлах и сплавах : докл. междунар. конф. ICOMAT-77. — Киев : Наукова думка, 1979. — С. 137–141.
53. Кащенко, М. П. Механизм мартенситного превращения, обусловленный неравновесностью электрон-фононной системы / М. П. Кащенко, Р. И. Минц // *Письма в ЖЭТФ*. — 1977. — Т. 26, № 6. — С. 433–435.
54. Кащенко, М. П. Микроскопический механизм мартенситного превращения в системе Fe-Ni / М. П. Кащенко, Р. И. Минц // *Письма в ЖЭТФ*. — 1978. — Т. 75, № 6 (12). — С. 2280–2289.
55. Кащенко, М. П. Кристонная модель формирования  $\alpha'$ -мартенсита деформации в сплавах на основе железа / М. П. Кащенко, А. Г. Семёновых, В. Г. Чащина // *Физическая мезомеханика*. — 2003. — Т. 6, № 3. — С. 37–56.
56. Olson, G.-B. A general mechanism of martensitic nucleation / G.-B. Olson, M. Cohen // *Metallurgica and Materials Transactions A*. — 1976. — V. 7. — Pp. 1905–1914.
57. Петров, Ю. Н. Дефекты и бездиффузионные превращения в стали / Ю. Н. Петров. — Киев : Наукова думка, 1978. — 262 с.
58. Поздняков, В. А. О термофлуктуационном и квантовом зарождении новой фазы в кристаллах (Механизм наслаивания дефектов упаковки) / В. А. Поздняков, В. А. Соловьёв // *Доклады Академии наук*. — 1980. — Т. 252, № 2. — С. 339–343.
59. Ройтбурд, А. Л. Зарождение на дислокациях при мартенситных превращениях / А. Л. Ройтбурд // *Доклады Академии наук*. — 1981. — Т. 256, № 1. — С. 80–84.
60. Chen, I.-W. Theory and experiment of martensitic nucleation in ZrO<sub>2</sub>-containing ceramics and ferrous alloys / I.-W. Chen, Y.-H. Chiao // *Acta Metallurgica*. — 1985. — V. 33, № 10. — Pp. 1827–1845.
61. Roytburd, A. L. On the thermodynamics of martensite nucleation / A. L. Roytburd // *Materials Science and Engineering A*. — 1990. — V. 127. — Pp. 229–238.
62. Kajiwa, S. Roles of dislocations and grain boundaries in martensite nucleation / S. Kajiwa // *Metallurgica and Materials Transactions A*. — 1986. — V. 17. — Pp. 1693–1702.
63. Поздняков, В. А. Механизмы зарождения мартенсита на границах зёрен / В. А. Поздняков // *Доклады Академии наук*. — 2007. — Т. 412, № 3. — С. 334–338.
64. Ueda, M. Controlling factor for the nucleation of martensite at grain boundary in Fe-Ni bicrystals / M. Ueda, H.-Y. Yasuda, Y. Umakoshi // *Acta Materialia*. — 2003. — V. 51. — Pp. 1007–1017.
65. Горностырев, Ю. Н. Микроскопический механизм мартенситного превращения. Теоретические представления и численное моделирование / Ю. Н. Горностырев // *Фазовые и структурные превращения в стали*. — 2001. — Вып. 1. — С. 20–52.

66. Dislocation-disclination model of heterogeneous martensite nucleation intranformation-induced-plasticity steels / M. Y. Gutkin [et al.] // *Metallurgica and Materials Transactions A*. — 2002. — V. 33. — Pp. 1351—1362.
67. Поздняков, В. А. Скейлинг поля напряжений нанокристаллов мартенсита и автокатализичность мартенситного превращения / В. А. Поздняков // *Доклады Академии наук*. — 2007. — Т. 414, № 4. — С. 477—479.
68. Глезер, А. М. Мартенситное превращение в микрокристаллических сплавах железо — никель / А. М. Глезер, Е. Н. Блинова, В. А. Поздняков // *Известия РАН. Серия физическая*. — 2002. — Т. 66, № 9. — С. 1263.
69. Бернштейн, М. Л. Термомеханическая обработка стали / М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский, Л. М. Капуткина. — Москва : Metallurgiya, 1983. — 480 с.
70. Fisher, J.-C. Nucleation / J.-C. Fisher, J.-H. Hollomon, D. Turnbull // *Journal of Applied Physics*. — 1948. — № 19. — Pp. 775—784.
71. Fisher, J.-C. Kinetics of the austenite-martensite transformation / J.-C. Fisher, J.-H. Hollomon, D. Turnbull // *J. Metals*. — 1949. — V. 1, № 10. — Pp. 649—701.
72. Пустовойт, В. Н. Исследование механизма образования зародышей мартенсита при закалке в магнитном поле / В. Н. Пустовойт, Ю. В. Долгачёв // *Упрочняющие технологии и покрытия*. — 2007. — № 3. — С. 4—7.

Материал поступил в редакцию 31.07.2012.

## References

1. Kurdjumov, G. Über den Mechanismus der Stahlhärtung / G. Kurdjumov, G. Sachs // *Zeitschrift für Physik*. — 1930. — Bd. 64, h. 5/6. — S. 325—342.
2. Kurdyumov, G. V. Prevrashhenie v zheleze i stali / G. V. Kurdyumov, L. M. Utevsij, R. I. E`ntin. — Moskva : Nauka, 1977. — 236 s. — In Russian.
3. Kurdyumov, G. V. Yavlenie zakalki i otpuska stali / G. V. Kurdyumov. — Moskva : Metallurgizdat, 1960. — 64 s. — In Russian.
4. Kurdyumov, G. V. Bezdiffuzionny`e (martensitny`e) prevrashheniya v splavax / G. V. Kurdyumov // *Zhurnal texnicheskoj fiziki*. — 1948. — T. 18, № 8. — S. 999—1025. — In Russian.
5. Kurdyumov, G. V. K teorii martensitny`x prevrashhenij / G. V. Kurdyumov // *Problemy` metallovedeniya i fiziki metallov : sb. trudov*. — Moskva : Metallurgizdat, 1952. — Vy`p. 3. — S. 9—44. — In Russian.
6. Kurdyumov, G. V. Prevrashhenie austenita v martensit pri nizkix temperaturax / G. V. Kurdyumov, O. P. Maksimova // *Problemy` metallovedeniya i fiziki metallov : sb. trudov*. — Moskva : Metallurgizdat, 1951. — Vy`p. 2. — S. 64. — In Russian.
7. Gulyaev, A. P. Martensitnoe prevrashhenie / A. P. Gulyaev // *Trudy` Nauchno-texnicheskogo obshhestva chyornoj metallurgii*. — 1955. — T. 3. — S. 57—72. — In Russian.
8. Gulyaev, A. P. Issledovanie martensitnogo prevrashheniya v stali / A. P. Gulyaev, A. N. Alfimov // *Zhurnal texnicheskoj fiziki*. — 1955. — T. 25, vy`p. 4. — S. 680—686. — In Russian.
9. Gulyaev, A. P. Martensitnoe prevrashhenie v zheleze / A. P. Gulyaev, M. A. Guzovskaya // *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. — 1977. — № 6. — S. 2—5. — In Russian.
10. Gulyaev, A. P. Issledovanie martensitnogo prevrashheniya v austenitnom poroshke / A. P. Gulyaev, V. D. Zelenova // *Fizika metallov i metallovedenie*. — 1958. — T. 6, vy`p. 5. — S. 945—946. — In Russian.

11. Gulyaev, A. P. Diagramma ob`yomnogo sostoyaniya faz v stali ShX15 / A. P. Gulyaev, B. M. Zel`bet // Fizika metallov i metallovedenie. — 1958. — T. 6, vy`p. 5. — S. 843–848. — In Russian.
12. Gulyaev, A. P. O prevrashhenii austenita v martensit pri temperaturax nizhe nulya. Ch. II / A. P. Gulyaev, V. G. Vorob`ev // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. — 1951. — Vy`p. 10. — S. 1164–1169. — In Russian.
13. Gulyaev, A. P. Metallograficheskoe issledovanie prevrashheniya austenita v martensit / A. P. Gulyaev, E. V. Petunina. — Moskva : Mashgiz, 1952. — 92 s. — In Russian.
14. Gulyaev, A. P. Issledovanie prevrashheniya austenita v martensit pri temperaturax, blizkix k absolyutnomu nulyu / A. P. Gulyaev, I. I. Lifanov // Trudy` Moskovskogo vechernego mashinostroitel'nogo instituta. — 1955. — Vy`p. 2. — S. 139–144. — In Russian.
15. Gulyaev, A. P. Termicheskaya obrabotka stali / A. P. Gulyaev. — Moskva : Mashinostroenie, 1960. — 496 s. — In Russian.
16. Gulyaev, A. P. Martensitnoe prevrashhenie v stali / A. P. Gulyaev // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. — 1959. — № 11. — S. 5–13. — In Russian.
17. Kraposhin, V. S. Chem otlichaetsya martensitnoe prevrashhenie ot normal'nogo? / V. S. Kraposhin, A. D. Sil`chenkov // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. — 2008. — № 11 (641). — S. 28–36. — In Russian.
18. Bain, E. C. The nature of martensite / E. C. Bain // Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers. — 1924. — V. 70. — Pp. 25–46.
19. Wayman, C.-M. Introduction to Crystallography of Martensitic Transformation / C.-M. Wayman. — New-York : MacMillan, 1964. — 168 p.
20. Arxarov, V. I. Kristallografiya zakalyonnoj stali / V. I. Arxarov. — Moskva : Metallurgizdat, 1951. — 144 s. — In Russian.
21. Kraposhin, V. S. Zolotoe sechenie v strukture metallov / V. S. Kraposhin // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. — 2005. — № 8. — S. 3–10. — In Russian.
22. Kraposhin, V. S. Politopny`j topologicheskij podxod k opisaniyu martensitnogo prevrashheniya / V. S. Kraposhin, A. L. Talis, M. N. Pankova // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. — 1999. — № 8. — S. 23–28. — In Russian.
23. Kraposhin, V. S. Structural realization of the polytope approach for the geometrical description of the transition of a quasicrystal into a crystalline phase / V. S. Kraposhin, A. L. Talis, J. M. Dubois // Journal of Physics: Condensed Matter. — 2002. — V. 14. — P. 8987–8996.
24. An application of a polytope (4D-polyhedron) concept for the description of polymorphic transition: iron martensite and solid oxygen / V. S. Kraposhin [et al.] // Journal de Physique IV France. — 2003. — V. 112. — P. 119–122.
25. Kraposhin, V. S. Novy`j mexanizm rastvoreniya ugleroda v reshyotke austenita pri cementacii stali i ego povedenie pri martensitnom i perlitnom prevrashheniyax austenita [E`lektron. resurs] / V. S. Kraposhin // Nauka i obrazovanie : e`lektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie. — 2011. — № 11. — Rezhim dostupa : <http://techno-new.developer.stack.net/doc/262290.html> (data obrashheniya: 23.12.12). — In Russian.
26. Pankova, M. N. Tryoxmernaya model` zapolneniya prostranstva zerna martensitny`mi kristallami pri prevrashhenii austenita / M. N. Pankova, V. S. Kraposhin // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. — 1999. — № 8. — S. 28–31. — In Russian.
27. Kraposhin, V. S. Description of polymorphic transformation of Ti and Zr in the framework of the algebraic geometry / V. S. Kraposhin, A. L. Talis, Y. J. Wang // Materials Science and Engineering. A. Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing. — 2006. — V. 438–440. — P. 85–89.

28. Kristallichesкое stroenie promezhutochny`x struktur v splavax s e`ffektom zapominaniya formy` kak realizaciya konstrukcij algebraicheskoy geometrii / V. S. Kraposhin [i dr.] // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. — 2007. — № 7. — S. 3—9. — In Russian.
29. Kraposhin, V. S. Struktura  $\omega$ -fazy` kak proekciya politopa {3, 4, 3} i promezhutochnaya konfiguraciya pri polimorfny`x prevrashheniyax v titane i cirkonii / V. S. Kraposhin, A. L. Talis, V. T. Nguen // Materialovedenie. — 2007. — № 8. — S. 2—9. — In Russian.
30. Kraposhin, V. S. Axial (helical) substructures determined by the root lattice E8 as generating clusters of the condensed phases / V. S. Kraposhin, A. L. Talis, M. I. Samoylovitch // Journal of Non-Crystalline Solids. — 2007. — V. 353. — P. 3279—3284.
31. Kraposhin, V. S. Vozmozhnosti obobshhyonnoj kristallografii: opisanie polimorfny`x prevrashhenij i novy`x defektov v strukture almaza / V. S. Kraposhin, A. L. Talis // Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Materialy` e`lektronnoj tekhniki. — 2006. — № 2. — S. 45—53. — In Russian.
32. Slyadnikov, E. E. Termodinamicheskaya teoriya strukturnogo prevrashheniya martensitnogo tipa / E. E. Slyadnikov // Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. — 2006. — T. 309, № 2. — S. 35—40. — In Russian.
33. Slyadnikov, E. E. Predperexodnoe sostoyanie i strukturny`j perexod v deformirovannom kristalle / E. E. Slyadnikov // Fizika tvyordogo tela. — 2004. — T. 46, № 6. — S. 1065—1071. — In Russian.
34. Slyadnikov, E. E. Osnovnoe sostoyanie v strukturno neustojchivom kristalle / E. E. Slyadnikov // Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. — 2005. — T. 308, № 5. — S. 14—18. — In Russian.
35. Slyadnikov, E. E. Gamil`tonian strukturno neustojchivogo kristalla / E. E. Slyadnikov // Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. — 2005. — T. 308, № 6. — S. 13—17. — In Russian.
36. Pushin, V. G. Predperexodny`e yavleniya i martensitny`e prevrashheniya / V. G. Pushin, V. V. Kondrat`ev, V. N. Xachin. — Ekaterinburg : Ural`skoe otdelenie RAN, 1998. — 367 s. — In Russian.
37. Maly`gin, G. A. Razmy`ty`e martensitny`e perexody` i plastichnost` kristallov s e`ffektom pamyati formy` / G. A. Maly`gin // Uspexi fizicheskix nauk. — 2001. — T. 171, № 2. — S. 187—212. — In Russian.
38. Panin, V. E. Strukturny`e urovni deformacii tvyordy`x tel / V. E. Panin, V. A. Lixachyov, Yu. V. Grinyaev. — Novosibirsk : Nauka, 1985. — 229 s. — In Russian.
39. Vonsovskij, S. V. Sverxprovodimost` perexodny`x metallov, ix splavov i soedinenij / S. V. Vonsovskij, Yu. A. Izyumov, E` . Z. Kurmaev. — Moskva : Nauka, 1977. — 383 s. — In Russian.
40. Uprugie i akusticheskie svojstva ionny`x, keramicheskix die`lektrikov i vy`sokotemperaturny`x sverxprovodnikov / V. N. Belomestny`x [i dr.]. — Tomsk : STT, 2001. — 226 s. — In Russian.
41. Pustovojt, V. N. Strukturny`e i kineticheskie osobennosti martensitnogo prevrashheniya v poristoj vy`sokouglerodistoj stali / V. N. Pustovojt, Yu. N. Churyukin, V. A. Blinovskij // Fizika metallov i metallovedenie. — 1991. — № 5. — S. 78—86. — In Russian.
42. Kaufman, L. Termodinamika i kinetika martensitny`x prevrashhenij / L. Kaufman, M. Koen // Uspexi fiziki metallov. — 1961. — № 4. — S. 192—290. — In Russian.
43. Easterling, K. The nucleation of martensite in steel / K. Easterling, A.-R. Tholen // Acta Metallurgica. — 1976. — V. 24, № 4. — Pp. 333—341.
44. Chen, I.-W. Theory and experiment of martensitic nucleations in  $ZrO_2$  containing ceramics and ferrous alloys / I.-W. Chen, Y.-H. Chiao // Acta Metallurgica. — 1985. — V. 33, № 10. — Pp. 1827—1847.
45. Sucuki, T. An experimental study of martensite nucleation and growth in 1818 stainless steel / T. Sucuki, H. Kojima, K. Sucuki // Acta Metallurgica. — 1977. — V. 25, № 7. — Pp. 1151—1162.
46. Brooks, E.-P. In situ observation of the formation of martensite in stainless steel / E.-P. Brooks, M.-N. Loretto, R.-E. Smallman // Acta Metallurgica. — 1979. — V. 27, № 12. — Pp. 1829—1838.

47. Haycelden, C. The martensite transformation in Fe-Ni-C alloys / C. Haycelden, B. Cantor // *Acta Metallurgica*. — 1986. — V. 34, № 2. — Pp. 233–242.
48. Ermakov, S. S. Metallokeramicheskie detali v mashinostroenii / S. S. Ermakov, N. F. Vyaznikov. — Leningrad : Mashinostroenie, 1975. — 232 s. — In Russian.
49. Ermakov, S. S. Termicheskaya obrabotka poroshkovy`x stal`ny`x detalej / S. S. Ermakov. — Leningrad : LDNTP, 1981. — 24 s. — In Russian.
50. Ermakov, S. S. Poroshkovy`e stali i izdeliya / S. S. Ermakov, N. F. Vyaznikov. — Leningrad : Mashinostroenie, 1990. — 319 s. — In Russian.
51. Kashhenko, M. P. Dinamicheskaya teoriya  $\gamma$ - $\alpha$  martensitnogo prevrashheniya v splavax zheleza i reshenie problemy` kriticheskogo razmera zerna / M. P. Kashhenko, V. G. Chashhina. — Moskva : NICz «Regulyarnaya i xaoticheskaya dinamika»; Izhevsk : Izhevskij institut komp`yuterny`x issledovaniy, 2010. — 132 s. — In Russian.
52. Kashhenko, M. P. Lazernaya model` martensitnogo prevrashheniya v splavax perexodny`x metallov / M. P. Kashhenko // *Martensitny`e prevrashheniya v metallax i splavax : dokl. mezhdunar. konf. ISOMAT-77*. — Kiev : Naukova dumka, 1979. — S. 137–141. — In Russian.
53. Kashhenko, M. P. Mexanizm martensitnogo prevrashheniya, obuslovlenny`j neravnovesnost`yu e`lektron-fononnoj sistemy` / M. P. Kashhenko, R. I. Mincz // *Pis`ma v ZhE`TF*. — 1977. — T. 26, № 6. — S. 433–435. — In Russian.
54. Kashhenko, M. P. Mikroskopicheskij mexanizm martensitnogo prevrashheniya v sisteme Fe-Ni / M. P. Kashhenko, R. I. Mincz // *Pis`ma v ZhE`TF*. — 1978. — T. 75, № 6 (12). — S. 2280–2289. — In Russian.
55. Kashhenko, M. P. Kristonnaya model` formirovaniya  $\alpha'$ -martensita deformacii v splavax na osnove zheleza / M. P. Kashhenko, A. G. Semyonovy`x, V. G. Chashhina // *Fizicheskaya mezomexanika*. — 2003. — T. 6, № 3. — S. 37–56. — In Russian.
56. Olson, G.-B. A general mechanism of martensitic nucleation / G.-B. Olson, M. Cohen // *Metallurgica and Materials Transactions A*. — 1976. — V. 7. — Pp. 1905–1914.
57. Petrov, Yu. N. Defekty` i bezdiffuzionny`e prevrashheniya v stali / Yu. N. Petrov. — Kiev : Naukova dumka, 1978. — 262 s. — In Russian.
58. Pozdnyakov, V. A. O termofluktuaionnom i kvantovom zarozhdenii novej fazy` v kristallax (Mexanizm naslaivaniya defektov upakovki) / V. A. Pozdnyakov, V. A. Solov`yov // *Doklady` Akademii nauk*. — 1980. — T. 252, № 2. — S. 339–343. — In Russian.
59. Rojtburd, A. L. Zarozhdenie na dislokaciyax pri martensitny`x prevrashheniyax / A. L. Rojtburd // *Doklady` Akademii nauk*. — 1981. — T. 256, № 1. — S. 80–84. — In Russian.
60. Chen, I.-W. Theory and experiment of martensitic nucleation in  $ZrO_2$ -containing ceramics and ferrous alloys / I.-W. Chen, Y.-H. Chiao // *Acta Metallurgica*. — 1985. — V. 33, № 10. — Pp. 1827–1845.
61. Rojtburd, A. L. On the thermodynamics of martensite nucleation / A. L. Rojtburd // *Materials Science and Engineering A*. — 1990. — V. 127. — Pp. 229–238.
62. Kajiwara, S. Roles of dislocations and grain boundaries in martensite nucleation / S. Kajiwara // *Metallurgica and Materials Transactions A*. — 1986. — V. 17. — Pp. 1693–1702.
63. Pozdnyakov, V. A. Mexanizmy` zarozhdeniya martensita na granicax zyoren / V. A. Pozdnyakov // *Doklady` Akademii nauk*. — 2007. — T. 412, № 3. — S. 334–338. — In Russian.
64. Ueda, M. Controlling factor for the nucleation of martensite at grain boundary in Fe-Ni bicrystals / M. Ueda, H.-Y. Yasuda, Y. Umakoshi // *Acta Materialia*. — 2003. — V. 51. — Pp. 1007–1017.
65. Gornosty`rev, Yu. N. Mikroskopicheskij mexanizm martensitnogo prevrashheniya. Teoreticheskie predstavleniya i chislennoe modelirovanie / Yu. N. Gornosty`rev // *Fazovy`e i strukturny`e prevrashheniya v stali*. — 2001. — Vy`p. 1. — S. 20–52. — In Russian.

66. Dislocation-disclination model of heterogeneous martensite nucleation intranformation-induced-plasticity steels / M. Y. Gutkin [et al.] // *Metallurgica and Materials Transactions A*. — 2002. — V. 33. — Pp. 1351—1362.

67. Pozdnyakov, V. A. Skejling polya napryazhenij nanokristallov martensita i avtokatalitichnost` martensitnogo prevrashheniya / V. A. Pozdnyakov // *Doklady` Akademii nauk*. — 2007. — T. 414, № 4. — S. 477—479. — In Russian.

68. Glezer, A. M. Martensitnoe prevrashhenie v mikrokristallicheskix splavax zhelezo — nikel` / A. M. Glezer, E. N. Blinova, V. A. Pozdnyakov // *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*. — 2002. — T. 66, № 9. — S. 1263. — In Russian.

69. Bernshtejn, M. L. Termomexanicheskaya obrabotka stali / M. L. Bernshtejn, V. A. Zajmovskij, L. M. Kaputkina. — Moskva : Metallurgiya, 1983. — 480 s. — In Russian.

70. Fisher, J.-C. Nucleation / J.-C. Fisher, J.-H. Hollomon, D. Turnbull // *Journal of Applied Physics*. — 1948. — № 19. — Pp. 775—784.

71. Fisher, J.-C. Kinetics of the austenite-martensite transformation / J.-C. Fisher, J.-H. Hollomon, D. Turnbull // *J. Metals*. — 1949. — V. 1, № 10. — Pp. 649—701.

72. Pustovoyt, V. N. Issledovanie mexanizma obrazovaniya zarody`shej martensita pri zakalke v magnitnom pole / V. N. Pustovoyt, Yu. V. Dolgachyov // *Uprochnyayushhie texnologii i pokry`tiya*. — 2007. — № 3. — S. 4—7. — In Russian.

## **NUCLEATION PROBLEMS OF THE MARTENSITIC TRANSFORMATION IN STEEL<sup>1</sup>**

**V. N. Pustovoyt, Y. V. Dolgachev**

(Don State Technical University)

*A review of papers on martensitic transformations is presented. To clarify the martensite nucleation mechanism in iron-carbon steels on the basis of the currently established understanding is the main purpose of the review. The martensitic transformation is one of the main types of phase transformations in the solid state which is observed in materials with different nature. Need for a thorough and comprehensive analysis of the structural states formed during steel quenching is determined by its scientific and applied relevance. The martensitic transformation models are presented and critically discussed. The transformation features inherent martensite nucleation in steel are marked. The specific model reconstructions of crystal lattices are shown. The energy barrierless martensite nucleation model is considered in the work. As follows from the analysis of the spatial configurations formed by the martensite plates, it is concluded that they are defined more by the general patterns of the crystal growth than by the interaction between the elastic fields of the colliding plates. It is noted that the generalization and projection of the obtained results on nonferrous and rather exotic model alloys for steel are incorrect. It is concluded that the mechanism of martensite nucleation in the iron-carbon steel is still not fully disclosed.*

**Keywords:** martensite, martensitic transformation, nucleation, crystal, hardening, steel.

---

<sup>1</sup> The research is done on 2.14.13 theme of DSTU thematic research plan within the frame of the government task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for 2012—2014.