

УДК 621.762:669.018

## ТЕОРИИ АУСТЕНИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

Саенков К.Л., Оглезнева С.А., Гревнов Л.М.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь,  
e-mail: severskl@mail.ru*

Исследован вопрос о природе аустенитно-мартенситных фазовых превращений в конструкционных и специальных сталях. Проанализированы различные подходы к описанию мартенситного превращения. Рассмотрены классические положения кристаллографического и термодинамического подходов в сравнении с современной динамической теорией. Представлены основные положения динамической теории мартенситного превращения, базирующейся на волновом механизме роста кристалла мартенсита. Показана определяющее влияние критического размера зерна на возможность или отсутствие возможности протекания аустенитно-мартенситного превращения в сплавах на основе железа. Определены роли границы зерна и дефектов кристаллического строения в механизме аустенитно-мартенситного превращения в рамках динамической теории, отличающиеся от их роли в классических описаниях. На базе положений динамической теории фазовых превращений показаны следствия измельчения зерна до критического размера, выражающиеся в потере пластичности сплавов, а также торможении превращения, практически вне зависимости от химического состава. Использование динамической теории фазовых превращений открывает перспективы в разработке новых сплавов (в том числе прецизионных и хладостойких) с управляемым аустенитно-мартенситным превращением.

**Ключевые слова:** структура, фаза, аустенит, мартенсит, классическая теория, термодинамическая, динамическая теория, превращение, кристалл, упрочнение, пластичность

## THEORY AUSTENITE-MARTENSITE TRANSFORMATION

Saenkov K.L., Oglezneva S.A., Grevnov L.M.

*Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: severskl@mail.ru*

Investigated the issue of the nature of austenite-martensitic phase transformations in structural and special steels is investigated. Various approaches to the description of the martensitic transformation are analyzed. The classical positions of the crystallographic and thermodynamic approaches are compared with the modern dynamic theory. The main provisions of the dynamic theory of martensitic transformation based on the wave mechanism of martensite crystal growth are presented. The determining role of the critical grain size for the possibility or absence of the possibility of austenitic-martensitic transformation in iron-based alloys is shown. The roles of grain boundaries and crystal structure defects in the mechanism of austenitic-martensitic transformation are determined within the framework of the dynamic theory, which differ from their role in classical descriptions. On the basis of the provisions of the dynamic theory of phase transformations, the consequences of grain refinement to a critical size are shown, which are expressed in the loss of plasticity of alloys, as well as in the inhibition of the transformation, practically regardless of the chemical composition. The use of the dynamic theory of phase transformations opens up prospects in the development of new alloys (including precision and cold-resistant ones) with a controlled austenitic-martensitic transformation.

**Keywords:** structure, phase, austenite, martensite, classical theory, thermodynamics theory, dynamical theory, the transformation, crystal hardening, plasticity

Исследование мартенситного превращения (МП) в сталях не утрачивает актуальности и особенную важность приобретает сегодня при разработке новых хладостойких материалов для Арктики, новых специальных сплавов для приборостроения, обладающих эффектами сверхпластичности, сверхупругости, памяти формы и другими аномальными механическими свойствами сплавов, так или иначе связанными с данным превращением. Понятие «мартенситное превращение» появилось во время изучения процессов, происходящих при быстром охлаждении сталей, приводящих к получению определенной структуры и высоких прочностных свойств. Во второй половине XX века были сформулированы особенности аустенитно-мартенситных превращений. Среди этих особен-

ностей присутствуют бездиффузионный, сдвиговый характер фазового превращения, быстрое развитие превращения при низких температурах, зависимость количества мартенсита от температуры и специфическая «мартенситная» структура [1].

Целью статьи является рассмотрение сущности теорий и подходов, описывающих мартенситное превращение – кристаллографического, термодинамического подходов и динамической теории.

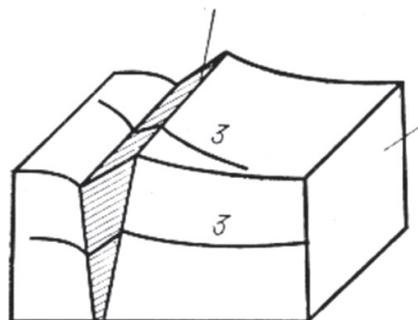
### Кристаллографический подход

Все превращения мартенситного типа имеют между собой ряд общих особенностей, таких как закономерность перемещений атомов относительно друг друга, направленность этих перемещений в процессе перестройки кристаллической решет-

ки исходной фазы в новую (образующую) фазу и кооперативность перемещений атомов. Эти особенности ведут за собой макроскопическое смещение и появление рельефа на поверхности. Полученные результаты Г.В. Курдюмова привели к определению мартенситного превращения: «Мартенситное превращение состоит в закономерной перестройке решетки, при которой атомы не обмениваются местами, а лишь смещаются друг относительно друга на расстояния, не превышающие межузельные» [2].

Закономерности перестройки атомов при  $\gamma$ - $\alpha$  превращениях следуют из определенных кристаллогеометрических соотношений между кристаллическими решетками (структурами)  $\gamma$  и  $\alpha$ -фаз. В результате аустенитно-мартенситного превращения из одной ориентировки  $\gamma$  фазы (зерна, монокристалла) может получиться 24 ориентировки мартенситной  $\alpha$ -фазы. Так же при приложении деформации количество возникших ориентировок мартенсита существенно уменьшается, в идеальных случаях это приводит к образованию одной, при которой наблюдается максимальная деформация. При обратном превращении из одной ориентировки  $\alpha$  фазы может возникнуть только конкретный вариант ориентировки  $\gamma$  (исходной) фазы. В частности, такая особенность связана с тем, что  $\alpha$ -фаза (мартенсит), образовавшаяся при охлаждении или при деформации, чаще имеет более низкую симметрию, чем высокотемпературная (исходная) фаза [3]. Чтобы полностью описать перестройку при  $\gamma$ - $\alpha$  превращении, недостаточно данных только по взаимной ориентировке фаз. Для определения механизма превращения необходимы сведения о межфазной границе кристаллов  $\alpha$  и  $\gamma$ -фаз, направлении и величине однородного макроскопического сдвига, типе и величине неоднородного сдвига, нужного для конечной перестройки структуры. При аустенитно-мартенситных превращениях часто образуются фазы с более низкой симметрией относительно исходной фазы [1]. Все эти схемы и механизмы должны давать соответствующие экспериментальным наблюдениям параметры и кристаллографические характеристики появляющихся структур, такие как взаимные ориентировки между фазами, ориентировку межфазной границы – габитуса, величину и направление макроскопического сдвига, тип неоднородного сдвига. Довольно часто в механизмах перестройки рассматривают два типа сдвигов – это однородный (макроскопический с появлением рельефа) и неоднородный (появляется тонкая

структура, двойники, дефекты упаковки, дислокации). Субструктура зависит от типа сплава, а также от вида мартенситного превращения. При перестройке кристаллической структуры исходной фазы в мартенситную оба сдвига происходят не последовательно один за другим, а одновременно. Поверхность превращенной области материала наклоняется к плоскости шлифа (рис. 1), но остается плоской [4].



*Рис. 1. Характер рельефа, возникающего на поверхности полированного шлифа в результате образования кристалла мартенсита (1 – исходная фаза; 2 – новая фаза (мартенсит)); 3 – линия, проведенная на плоской поверхности образца, в исходном состоянии она остается непрерывной и после образования мартенситной фазы)*

В механизме перестройки, к примеру для МП в сплавах железо-никель-углерод, на начальной стадии в иррациональной габитусной плоскости происходит макроскопический сдвиг, приводящий к рельефу на полированной поверхности. В результате образуется триклинная структура с идентичным расположением атомов и межплоскостными расстояниями, как для мартенситной плоскости. На следующем этапе происходит сдвиг не приводящий к изменению формы превращаемого объема, так как сдвиг, однородный только в небольших объемах и неоднородный макроскопически. Промежуточная триклинная решетка преобразуется (в результате второго сдвига) в мартенситную решетку (ОЦТ). Для этих двух сдвигов выбор плоскостей и направлений определяется минимальным углом сдвига и минимальным изменением параметров. Для получения мартенситной решетки правильных размеров, кроме таких сдвигов, необходимо расширение в направлении [100] на 4,2%. Такой механизм перестройки  $\gamma$ -структуры в  $\alpha$ -структуру (исходную в мартенситную), учитывает объемные изменения при превращении. Такой механизм пре-

вращения подтверждает предположения о двух сдвигах при мартенситных превращениях и являлся причиной разработки моделей и процессов перестройки кристаллической решетки во время мартенситного превращения [5].

### Термодинамический подход

Возможность бездиффузионного образования новой (мартенситной) фазы по термодинамическому обоснованию означает, что рост  $\alpha$ -фазы (состав которой соответствует исходной) происходит с понижением свободной энергии. Кроме объемной энергии, здесь не учитывается процесс зарождения и иные составляющие для свободной энергии рассматриваемого сплава. Кинетика аустенитно-мартенситного превращения в сплавах одной и той же системы (железо-углерод, железо-никель, железо-никель-углерод) имеет большое разнообразие. Именно эти различия (разнообразии) отличают  $\gamma - \alpha$  превращения от других. В одних превращениях мартенситного типа можно наблюдать как взрывную реакцию, так и постепенный процесс развития по мере охлаждения и медленное образование превращенного объема, или даже подавление превращения при быстром охлаждении в область температур жидкого азота [3]. В сплавах с самым низким положением мартенситной точки превращение в ходе охлаждения идет как серия мелких взрывов, и нет подрастания количества мартенсита при

постоянной температуре. Понижение температуры не замедляет этого превращения и увеличения скорости охлаждения, соответственно, не позволяет задержать образования мартенсита. Такой тип превращения называется «атермическим». Превращение по атермической кинетике (атермическое МП) при изменении температуры всегда начинается и заканчивается при строго определенных температурах как при прямом ( $M_n, M_k$ ), так и при обратном ( $A_n, A_k$ ) переходе и характеризуется некоторым гистерезисом (рис. 2) [4]. Величина гистерезиса при атермическом МП может колебаться от нескольких сотен градусов (превращение с большим гистерезисом, например в сплавах на основе железа) до нескольких десятков градусов (термоупругое превращение, например в сплавах на основе меди). В случае термоупругого МП увеличение количества мартенситной фазы при понижении температуры происходит за счет образования новых кристаллов мартенсита и путем подрастания ранее возникших [6].

При самой низкой температуре быстрый рост мартенситных кристаллов приводит к их взаимной деформации «вторжением» и пересечением. При исследовании структуры внутри кристаллов можно заметить четкие линии – скопления очень тонких двойников; в остальной части кристаллов атермического мартенсита также выявляются двойники, но более широкие и редкие [6].

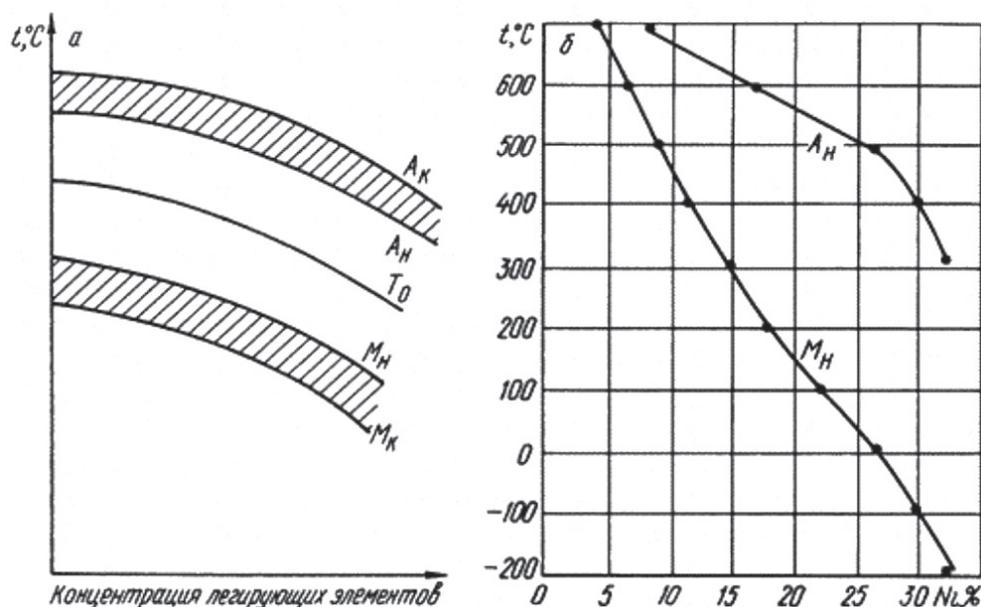


Рис. 2. Температуры прямого ( $M_n$ - $M_k$ ) и обратного ( $A_n$ - $A_k$ ) превращений в системе Fe-Ni

### Динамическая теория

Динамическая теория  $\gamma$ - $\alpha$  фазового превращения подразумевает под собой подход, который разрабатывался для описания возникновения и распространения носителей пороговой деформации, инициирующей  $\gamma$ - $\alpha$  (ГЦК-ОЦК или ОЦТ) мартенситное превращение (МП) в сплавах на основе железа. На сегодняшний день выпущено множество трудов как для интерпретации особенностей протекания аустенитно-мартенситного превращения (связанных с носителями пороговой деформации), так и при создании динамического подхода к теории формирования кристаллов мартенсита. Идея теории, дополнительной к термодинамическому подходу, сводится к расшифровке динамической структуры возбужденного состояния решетки в неравновесной области фронта нелинейной волны превращения. Один из сценариев роста мартенсита с позиции волновой теории указывает, что в прилегающих к границе областях при взаимодействии мартенситного кристалла с границей могут рождаться дислокации, становящиеся центрами зарождения новых мартенситных кристаллов (рис. 3) [7].

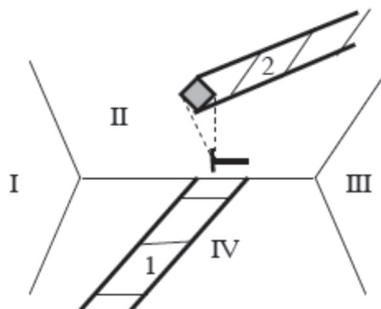


Рис. 3. Схема эстафетного роста, взаимодействие кристалла 1 с границей между зернами IV и II приводит к рождению в зерне II дислокационного центра зарождения для запуска роста кристалла 2

Основой аксиоматики динамической теории является концепция гетерогенного зарождения и волнового роста мартенситного кристалла. Зависимость размера зерна от химического состава позволяет объяснить существование предельной для протекания  $\gamma$ - $\alpha$  превращения концентрации легирующего элемента в сплаве [6, 7]. Превращения мартенситного типа в твердых телах представляют собой варианты реализации полиморфизма, особенность которых – кооперативный характер смещения атомов. Динамическая модель формирования двойников превращения представляет-

ся как распространение пар налагающихся коротковолновых смещений, согласованное с управляющим на мезомасштабе волновым процессом. Динамический подход описывает все морфологические характеристики в виде аналитических зависимостей от упругих свойств  $\gamma$ -фазы.

Существует два предельных случая реализации мартенситных превращений в металлах и сплавах. Превращение может протекать как переход второго рода в равновесных условиях, тогда в системе при температуре  $M_n$  происходит «размягчение» решетки, структура  $\alpha$ -фазы рассматривается как следствие искажений  $\gamma$ -фазы. Мартенситное превращение протекает как ярко выраженный переход первого рода в неравновесных условиях. В фоновом спектре исходной фазы и до температуры  $M_n$  отсутствуют заметные аномалии, что указывает на метастабильную устойчивость кристаллической решетки. Рост кристаллов осуществляется за счет распространения управляющего процесса, несущего локализованную в области волнового фронта пороговую деформацию. При таких превращениях симметрии решеток исходной и конечной фаз не связаны отношением соподчинения. Классическим примером здесь является аустенитно-мартенситное превращение в сплавах на основе железа. В таком случае неравновесная электронная подсистема в области волнового фронта при определенных условиях способна генерировать бегущие волны смещений, поддерживая тем самым управляющий волновой процесс [8].

Для переходных металлов характерно наличие сравнительно узких энергетических зон с несколькими пиками в плотности состояний. Накопленная для реконструктивных МП информация свидетельствует, что образующиеся мартенситные кристаллы обладают набором взаимосвязанных морфологических признаков (кристаллографические ориентации габитусных плоскостей, макросдвига, решеток  $\gamma$  и  $\alpha$ -фаз), отражающих кооперативный характер этого процесса. Данный подход эффективен и для фазовых переходов первого рода близких к переходам второго рода, так как наличие дефектов дает возможность для начала мартенситного превращения при температуре, многим отличающейся от температуры абсолютной потери устойчивости кристаллической решетки. Имеющаяся на сегодняшний день информация о МП свидетельствует, что образующиеся мартенситные кристаллы обладают набором взаимосвязанных морфологических признаков, таких как кристаллографические ориента-

ции габитусных плоскостей, макросдвиг, решетки  $\gamma$  и  $\alpha$ -фаз; отражающих кооперативный характер данного процесса.

Динамическая теория также рассматривает возможности протекания аустенитно-мартенситного превращения в объемных нанокристаллических материалах. Такой тип превращения, не обладающий полным представительным набором морфологических признаков, характерным для мартенсита охлаждения, предложено именовать «аккомодационным» [9]. Динамическая теория дополняет результаты исследований спонтанного аустенитно-мартенситного превращения, описывает механизмы формирования кристалла в зернах с размером, превышающий критический (такой размер зерна, где не может поместиться дислокация), имеет наиболее полное описание особенностей МП, относительно классических подходов к теории аустенитно-мартенситных превращений [10].

### Выводы

Все теории и подходы к описанию мартенситных превращений, существующие на сегодняшний день, могут применяться в зависимости от состава материала и технологий его производства.

Кристаллографический подход к описанию аустенитно-мартенситного превращения в сталях учитывает все основные физические механизмы  $\gamma$ - $\alpha$  превращения. Одним из ключевых механизмов здесь является то, что деформация аустенита преобразует исходную решетку в решетку мартенсита.

Термодинамический подход указывает на то, что в условиях большого переохлаждения не может произойти диффузионный распад аустенита на ферритокарбидную смесь, приводящий систему к абсолютному минимуму свободной энергии, и аустенит бездиффузионным способом превращается в мартенсит, что приводит систему к относительно минимуму свободной энергии.

Динамическая теория основывается на концепции гетерогенного зарождения и управляемого волнового роста. Отличительной особенностью динамической теории является положение о том, что превращение начинается не на границе зерна (как при кристаллографическом подходе), а в его объеме. Превращение, согласно динамической теории, так же провоцируют дефекты структуры (как и в других подходах), но обычно в классических теориях дефектом считается граница зерна, так как на ней есть дислокации. Координата начала

зарождения кристалла мартенсита зависит от распространения по зерну упругих деформаций, вызванных наличием дефекта структуры. Самое важное следствие анализа кинетики превращения с позиции динамической теории – если размер зерна будет настолько мал, что в нем не поместится дислокация, то превращение не произойдет, вне зависимости от химического состава и температуры, и этот размер зерна называется критическим [1].

Все процессы, происходящие при мартенситном превращении, до сих пор заслуживают большого внимания со стороны научного сообщества для обеспечения необходимых свойств результатов деятельности производственной сферы. Описание всех механизмов превращения, прогнозирование всех явлений, происходящих во время данного процесса, позволит получить необходимые, задуманные разработчиком свойства конечного результата машиностроительных отраслей производства.

*Статья подготовлена при поддержке грантов РФФИ № 14-08-00734 и 16-48-590224.*

### Список литературы

1. Исследование влияния размера зерна на температуру фазового превращения сплавов на основе железа при охлаждении до 4 К / С.А. Оглезнева, К.Л. Саенков // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18. № 2. – С. 187–199.
2. Курдюмов В.Г. Явления закалки и отпуска стали. – М.: Металлургия, 1960. – 64 с.
3. Арзамасов Б.Н., Сидорин И.И., Косолапов Г.Ф. и др. Материаловедение: учебник для вузов. – 2-е издание, испр. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
4. Christian J.W. The Theory of Transformations in Metals and Alloys. Parts I and II, Pergamon. – 2002. – 3 ed. – 1200 p.
5. Лободюк В.А. Мартенситные превращения / В.А. Лободюк, Э.И. Эстрин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 352 с.
6. Эстрин Э.И. Мартенситные и «нормальные» превращения // Известия РАН. Серия физическая. – 2009. – Т. 73, № 9. – С. 1238–1246.
7. Кащенко М.П., Чашина В.Г. Кристаллодинамика ОЦКГПУ-мартенситного превращения. II. Морфология // Физика металлов и материаловедение. – 2008. – Т. 106, № 1. – С. 16–25.
8. Кащенко М.П., Чашина В.Г. Динамическая теория  $\gamma$ - $\alpha$  мартенситного превращения в сплавах железа и решение проблемы критического размера зерна. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевский институт компьютерных исследований, 2010. – 132 с.
9. Кащенко М.П., Чашина В.Г. Динамическая модель формирования двойникованных мартенситных кристаллов при  $\gamma$ - $\alpha$ -превращении в сплавах железа. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2009. – 98 с.
10. Кащенко М.П., Чашина В.Г. Кристаллодинамика ОЦКГПУ-мартенситного превращения. I. Управляющий волновой процесс // Физика металлов и материаловедение. – 2008. – Т. 105, № 6. – С. 571–577.