

ДИНАМИЧЕСКИЕ СЦЕНАРИИ МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ И ХАРАКТЕРНЫЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ

Кащенко М.П.¹, Чашина В.Г.¹, Заплатина И.О.², Печорский В.И.²

¹Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина, Екатеринбург, Россия (620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19), trk46@mail.ru

²Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия, (620100 Екатеринбург, Сибирский тракт, 37)

Динамическая теория спонтанных (протекающих при изменении температуры) реконструктивных мартенситных превращений соответствует новой парадигме для фазовых переходов первого рода в кристаллических твердых телах. В основе теории лежит представление о начальном возбужденном (колебательном) состоянии, заменяющее представление о квазиравновесных зародышах новой фазы применительно к быстрому (сверхзвуковому) росту кристаллов. Это состояние возникает в определенных областях упругих полей, создаваемых дислокациями, и порождает управляющий волновой процесс. Следовательно, концепции гетерогенного зарождения и последующего роста сохраняются, но существенно модифицируются. В рамках новой парадигмы дается перечень динамических вариантов формирования мартенситных кристаллов при прямых и обратных превращениях. Отмечается возможность комбинирования вариантов при использовании представлений о быстро реализуемом промежуточном состоянии. Обращается внимание на характерные морфологические признаки, полезные для идентификации динамических сценариев спонтанной мартенситной реакции. Формированию мартенсита деформации сопоставляется дополнительный сценарий.

Ключевые слова: мартенситное превращение, динамическая теория, промежуточное состояние (фаза), морфологические признаки.

DYNAMIC SCENARIOS OF MARTENSITIC TRANSFORMATIONS AND CHARACTERISTIC MORFOLOGICAL FEATURES

Kashenko M.P.¹, Chashina V.G.¹, Zaplatina I.O.², Peshorskiy V.I.²

¹Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia, (620002, Ekaterinburg, Mira str.,19), mpk46@mail.ru

²Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russia, (620100, Ekaterinburg, Siberian trakt, 37)

Dynamic theory of spontaneous (occurring when the temperature changes) reconstructive martensitic transformations corresponds to a new paradigm for the first order phase transitions in crystalline solids. The theory is based on the representation of the initial excited (oscillatory) state. This concept replaces the concept of the existence of thermodynamically equilibrium (or quasi-equilibrium) nuclei of the new phase with respect to the rapid (supersonic) crystal growth. The initial excited state arises in certain areas of the elastic fields produced by dislocations and generates a control wave process. Consequently, the concepts of heterogeneous nucleation and subsequent growth remain but are substantially modified. The new paradigm is given a list of scenarios for the dynamic formation of martensite crystals at direct and inverse transformations. The possibility of the combining of different scenarios with using of the quickly arisen intermediate states is noted. The attention to the characteristic morphological features that are useful for the identification of dynamic scenarios of spontaneous martensitic reactions is addressed. The formation of strain -martensite is considered as the additional scenario.

Keywords: martensitic transformaion, dinamic theory, intermediate state (phase), morphological feaures.

Хорошо известно, что отличительной чертой как прямых (при охлаждении), так и обратных (при нагреве) мартенситных превращений (МП) является кооперативный характер смещений атомов. Классическим примером прямого МП является $\gamma - \alpha$ МП в сплавах железа [1], которое протекает с ярко выраженными признаками фазовых переходов первого рода. Важной особенностью роста отдельных кристаллов является сверхзвуковая (по отношению к продольным волнам) скорость их формирования. Учет этого обстоятельства позволил

развить динамическую теорию МП [2, 3], в которой кооперативный характер превращения обеспечивает управляющий волновой процесс (УВП). УВП локализуется в области фронта нелинейной волны превращения. Его формирование связано с появлением начального возбужденного (колебательного) состояния (НВС) в упругом поле дислокационных центров зарождения (ДЦЗ), нарушающих симметрию исходной фазы и снижающих межфазные барьеры (энергетические и деформационные). В структуре УВП присутствует, как минимум, пара продольных (либо квазипродольных) волновых пучков, ответственных за описание ориентации габитусной плоскости кристалла (ℓ - волны). Кроме того, могут присутствовать и пары волновых пучков с меньшими длинами волн (s - волны), необходимые для формирования двойников превращения и действующие согласованно с более длинными ℓ - волнами [3]. Как показывает анализ [3], переход к финальным деформациям от порогового уровня по времени может быть разделен на два этапа. Первый быстрый этап связан с s - волнами, на нем достигаются равные деформации растяжения и сжатия, дополняемые на втором этапе относительно длинноволновыми деформациями. Такие варианты УВП позволяют инициировать процесс бейновской деформации, приводящей к кратчайшим путям перестройки структуры и, следовательно, к минимальным интервалам времени и максимальным скоростям МП. В качестве примера может служить описание двойникованных тонкопластинчатых кристаллов или средней части (мидриба) линзовидных кристаллов с габитусами $\{2\ 5\ 9\}_\gamma - \{3\ 10\ 15\}_\gamma$.

Следует отметить, что высокая скорость протекания превращения исключает влияние диффузионных процессов во время роста кристаллов. Но на подготовительном (инкубационном) этапе, предшествующем возникновению НВС, роль диффузии компонентов сплава может быть существенной, как это имеет место, например, при бейнитном превращении [4].

Второй сценарий, доказавший свою конструктивность применительно к ОЦК-ГПУ ($\alpha - \epsilon$) МП на примере титана [5] (как и для ГЦК-ОЦК МП [6]), акцентирует внимание на быстрой плоской деформации типа растяжения – сжатия, инициированной парой волн (ответственных за описание габитусов кристаллов), плоскостей $\{110\}_\alpha$ с достаточно плотной упаковкой атомов и дополнительной перетасовкой деформированных плоскостей. Следует подчеркнуть, что такая перетасовка (а точнее, неоднородный сдвиг) не сказывается на макроскопических морфологических признаках, к которым относятся ориентация габитусной плоскости, межфазные ориентационные соотношения (ОС) и макросдвиг.

Подчеркнем, сценарий перетасовки плотноупакованных плоскостей может выступать в качестве совершенно независимого третьего сценария для политипных МП, простейшими примерами которых являются ГЦК – ГПУ ($\gamma - \epsilon$) [7] и обратное $\epsilon - \gamma$ превращения. Этот

сценарий, связан с согласованным действием продольных и поперечных смещений. Основная идея [7] состоит в том, что перетасовка посредством поперечных смещений пар (или большего числа) плотноупакованных плоскостей (временно обособляемых относительно коротковолновыми продольными смещениями) происходит в те моменты времени, когда вторая система продольных смещений с большими длинами волн обеспечивает увеличение расстояния между соседними обособленными группами плоскостей. Ясно, что в такие моменты времени взаимодействие между подобными группами плоскостей ослаблено. Нелинейное возбуждение решетки такого типа близко к бризерному варианту, и скорость его распространения может быть небольшой, как показывает анализ [8] для возбуждений с чисто продольными смещениями. Третий сценарий МП применительно к ГЦК-ГПУ МП иллюстрирует Рис. 1, взятый из [7].

На рис. 1 представлена пара продольных волн смещений. Одна из них (с наименьшей для направления $[111]_Y$ длиной волны $\lambda_{2\parallel}$) обеспечивает попарное обособление плотноупакованных плоскостей вида (AB)-(CA)-(BC)-(AB)-..., означающего, что расстояние между плоскостями, заключенными в скобки, меньше расстояния между ближайшими плоскостями, принадлежащими соседним обособленным парам, что снижает сопротивление для попарного перетасовочного сдвига. Вторая продольная волна с длиной волны $\lambda_{1\parallel} = 6\lambda_{2\parallel}$ способна в фазе растяжения обеспечить дополнительное увеличение расстояния между обособленными парами, снижая в еще большей степени сопротивление для попарного перетасовочного сдвига пар плоскостей (CA) \uparrow -(BC) \downarrow , переводящего их в пары (AB)-(AB). В то же время эта волна с максимумами смещений, приходящимися на пары плоскостей (AB), блокирует перетасовку данного типа пар, что и требуется для перестройки ГЦК-ГПУ. Саму перетасовку способна инициировать как линейно поляризованная поперечная волна, так и циркулярно поляризованная волна (на рис. 1 схематически отражено действие именно циркулярной волны). Заметим, что для наглядности величина смещений при попарном обособлении плоскостей явно преувеличена (пары плоскостей, нумеруемые заглавными буквами со штрихами).

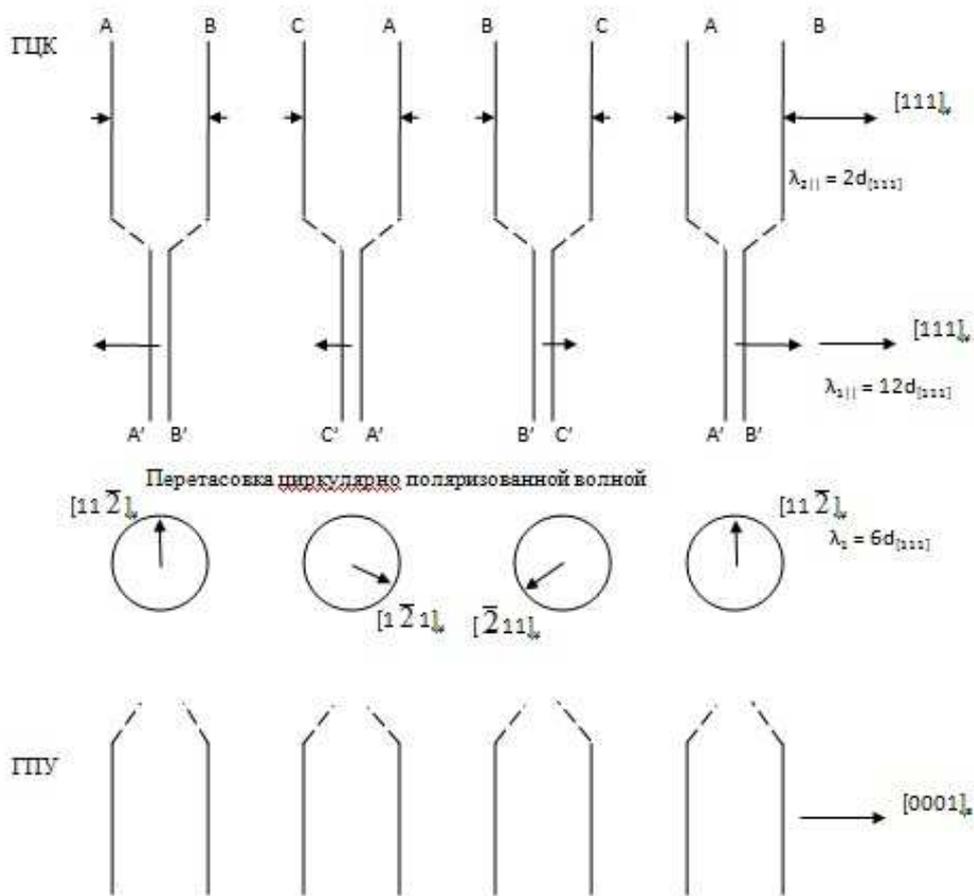


Рис. 1 Вариант ГЦК-ГПУ динамической перестройки с участием пары продольных волн и циркулярно поляризованной поперечной волны.

К четвертому сценарию МП можно отнести комбинированный вариант, в котором быстро (со сверхзвуковой скоростью) УВП инициирует формирование некоторого промежуточного состояния (ПС) при отношении финальных деформаций, совпадающих с отношением деформаций в пороговом режиме, и последующей эволюцией ПС либо путем релаксации в конечное состояние, либо с помощью нового варианта УВП, как показывает [9], анализ В2-ПС-В19 и В2-В19- В19' МП в сплавах на основе никелида титана, обладающих эффектом памяти формы. В качестве промежуточного состояния может выступать и вполне определенная фаза, например, В19 в упомянутом выше примере или ϵ -фаза при обратном α - ϵ - γ МП в сплавах железа. Заметим, что если второй этап четвертого сценария связан с перетасовкой плоскостей, то макроскопические морфологические признаки не изменяются и, следовательно, задаются динамикой превращения на первом этапе.

Следует подчеркнуть, что для второго сценария МП характерно включение в межфазные ориентационные соотношения именно тех плоскостей исходной фазы, которые испытывают трансформацию в ходе МП, причем эти плоскости перпендикулярны

габитусным плоскостям кристалла. Дополнительная особенность может быть связана с трансформацией плоскости, являющейся плоскостью симметрии исходной фазы. Именно для этого случая должна реализоваться строгая параллельность плоскостей, входящих в ОС, тогда как для остальных вариантов характерны разориентировки (пусть и небольшие) подобных плоскостей.

В то же время для первого сценария плоскости, входящие в ОС, образуют с габитусами наименьшие углы, а для третьего сценария (выступающего в качестве самостоятельного) габитусная плоскость совпадает с ориентацией плоскостей, меняющих порядок укладки. Таким образом, имея информацию о наблюдаемых морфологических признаках можно судить о наиболее вероятном динамическом сценарии МП применительно к спонтанному формированию мартенсита (при охлаждении или нагревании).

Отдельный (пятый) сценарий относится к мартенситу деформации, образующемуся на стадии пластического течения материала. Особенности этого МП адекватно описываются в модели кристонных носителей пороговой деформации [10]. Эти носители сдвига возникают при контактном взаимодействии дислокаций с пересекающимися плоскостями скольжения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (номер проекта 14-08-00734)

Список литературы

1. Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. – М.: Наука, 1977. – 240 с.
2. Кащенко М.П., Чащина В.Г. Динамическая модель сверхзвукового роста мартенситных кристаллов // УФН. – 2011. – Т. 181. - № 4. – С. 345-364.
3. Кащенко М.П., Чащина В.Г. Динамическая модель формирования двойникованных мартенситных кристаллов при $\gamma - \alpha$ превращении в сплавах железа. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2009. – С. 98.
4. Кащенко М.П., Чащина В.Г. Оценка эффективной скорости роста пластины бейнитного феррита в динамической теории // ФММ. – 2013. – Т. 114. - № 3. – С. 290-296.
5. Кащенко М.П., Чащина В.Г. Кристаллодинамика ОЦК-ГПУ мартенситного превращения. II. Морфология мартенсита // ФММ. – 2008. – Т. 106. - № 1. – С. 16-25.
6. Кащенко М.П., Чащина В.Г. Механизм ГЦК – ОЦК мартенситного превращения с наибо́льшей перестройкой плотно- упакованных плоскостей. I. Соотношение параметров решеток и габитусные плоскости // Известия вузов. Физика. – 2008. - № 7. – С. 3-7.

7. Чашина В.Г. Модифицированная динамическая модель ГЦК - ГПУ мартенситного превращения без макросдвига // Известия вузов. Физика. – 2009. - № 7. – С. 92-94.
8. Тахтаджан Л.А., Фаддеев Л.Д. Гамильтонов подход в теории солитонов. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1986. – 528 с.
9. Кащенко М.П., Чашина В.Г. Динамическая модель формирования промежуточного мезоскопического состояния при В2→В19-мартенситном превращении // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. - № 5. – С. 65-68.
10. Кащенко М.П., Чашина В.Г., Семеновых А.Г. Кристонная модель формирования α' мартенсита деформации в сплавах на основе железа // Физическая мезомеханика. – 2003. – Т.6. - №3. – С. 37-56.

Рецензенты:

Потехин Б.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии металлов ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет», Министерство образования и науки РФ, г.Екатеринбург;

Пугачева Н.Б., д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН), Министерство образования и науки РФ, г.Екатеринбург.