

Правила отбора дислокационных центров зарождения мартенсита в динамической теории реконструктивных мартенситных превращений

Кащенко М.П.^{1,2,†}, Латыпов И.Ф.¹, Нефедов А.В.², Семеновых А.Г.², Чащина В.Г.^{1,2}

[†]mpk46@mail.ru

¹Уральский федеральный университет, Мира 19, 620002, Екатеринбург

²Уральский государственный лесотехнический университет, Сибирский тракт 37, 620100, Екатеринбург

В свете новой парадигмы дается краткий обзор работ, отражающих, в основном, эволюцию динамической теории мартенситных превращений применительно к правилам отбора дислокационных центров зарождения мартенситных кристаллов. Отмечается, что учет квазипродольности волн изменяет соотношение между отношениями скоростей волн и деформаций.

Ключевые слова: мартенситные превращения, динамическая теория, дислокационные центры зарождения, квазипродольные волны.

The rules for selection of dislocation nucleation centers of martensite in the dynamic theory of reconstructive martensitic transformations

M.P. Kashchenko^{1,2}, I.F. Latypov¹, A.V. Nefedov², A.G. Semenovych², V.G. Chashchina^{1,2}

¹Ural Federal University, Mira 19, 620002, Ekaterinburg

²Ural State Forestry University, Sibirskiy Trakt 37, 620100, Ekaterinburg.

In the light of the new paradigm provides a brief overview of the works, reflecting mainly the evolution of the dynamical theory of martensitic transformations applied to the selection rules of dislocation nucleation centers of martensitic crystals. It is noted that the inclusion of quasi-longitudinal waves alters the balance between the ratio of the speeds of the waves and deformations.

Keywords: martensitic transformations, dynamic theory, dislocation nucleation centers, quasi-longitudinal waves.

1. Введение

Известно, что многие реконструктивные мартенситные превращения (МП) могут протекать с высокой скоростью путем кооперативных смещений атомов, обладая ярко выраженными признаками переходов I рода. Естественное для переходов I рода представление о гетерогенном характере зарождения предполагает конкретизацию соответствующего дефекта. Специфика подобных МП – возможность сверхзвукового роста кристаллов, находит адекватное отражение в рамках новой парадигмы (см. напр. [1-4]). В рамках этой парадигмы вместо традиционного представления о квазиравновесных зародышах (приемлемого для медленно протекающих превращений) вводится понятие начального возбужденного состояния (НВС), возникающего в упругих полях дислокационных центров зарождения (ДЦЗ). Цель работы – осветить коррективы, вносимые

развитой динамической теорией МП в правила отбора потенциальных ДЦЗ.

2. Правила отбора ДЦЗ на предшествующих этапах развития динамической теории

Первоначально динамическая теория ограничивалась только описанием порогового режима, а в качестве ДЦЗ рассматривались лишь бесконечные прямолинейные дислокации. На этом этапе была предложена методика отбора ДЦЗ на основе анализа создаваемых ими упругих полей дисторсии χ , создающих благоприятные условия для локализации начального возбужденного состояния решетки.

К этим условиям относятся: 1) наличие подходящего по знаку изменения удельного объема δ (например, для γ - α МП в сталях $\delta > 0$); 2) существование деформации, близкой к деформации с инвариантной плоскостью, когда тензор дисторсии практически сводится к диаде:

$$\chi \approx \mathbf{S} \cdot \mathbf{N}, \quad |\mathbf{N}|=1, \quad (1)$$

где \mathbf{N} вектор нормали к инвариантной или слабоискаженной плоскости, а \mathbf{S} вектор, характеризующий изменение формы; 3) близость вектора \mathbf{N} к направлению нормали к габитусной плоскости, а направления \mathbf{S} - к наблюдаемому направлению макросдвига; 4) линия дислокации и плоскость скольжения должны соответствовать направлению и плоскости исходной фазы, входящим в межфазное ориентационное соотношение [5].

Высокая скорость образования кристаллов мартенсита указывает на существование волнового механизма управления ростом. К хорошему соответствию с данными эксперимента приводит двухволновая модель управления [1-4, 6], в которой волновые нормали $\mathbf{n}_{1,2}$ квази-продольных волн, несущих пороговую деформацию типа растяжение-сжатие в ортогональных направлениях, выбираются близкими к ориентациям собственных векторов ξ_1 и ξ_2 тензора упругой деформации в локальной области с дисторсией (1). Поэтому в качестве дополнительного критерия выступает требование близости вектора \mathbf{N}_w (нормали к габитусу мартенситного кристалла в волновой модели) к экспериментально наблюдаемой нормали \mathbf{N}_α к габитусной плоскости, где \mathbf{N}_w выбирается из бинарного спектра:

$$\mathbf{N}_w \parallel \mathbf{n}_2 \pm (v_2/v_1)\mathbf{n}_1, \quad |\mathbf{n}_{1,2}|=1, \quad (2)$$

v_2 и v_1 - модули скоростей волн.

Следует отметить также, что обычно наблюдается заметное рассеяние нормалей к габитусным плоскостям, что ставит вопрос о его физической причине. Существенное значение, как обсуждалось еще в [7], имеет и вопрос о расстоянии r до области локализации НВС. Принципиальные ответы на эти вопросы были получены после расчета упругих полей дислокационных петель [8] в форме параллелограммов и прямоугольников, причем анализировались поля как скользящих, так и призматических петель. Выбор петель в качестве ДЦЗ продемонстрировал существенную неоднородность их упругих полей, приводящую к изменению ориентации габитусов при изменении не только угловых, но и пространственных координат области локализации НВС. Уже на этом этапе стало ясно, что приведенное выше четвертое условие отбора, касающееся соответствия ориентаций линий ДЦЗ и плоскостей скольжения с направлениями и плоскостями, входящими в межфазные ориентационные соотношения, носит частный характер.

Переход от отдельных петель к их ансамблям, описывающим кристонные носители сдвига [9-11], вносит дополнительное разнообразие в спектр возможных ДЦЗ, включая в сферу анализа не только мартенсит, возникающий спонтанно (при охлаждении), но и мартенсит деформации.

3. Современный этап развития динамической теории

Современный этап развития динамической теории характеризуется, во-первых, включением в рассмотрение перехода от порогового режима к финальным деформациям [12-14], превышающим на два-три порядка пороговые значения. Во-вторых, уточняется описание

управляющего волнового процесса, связанное с переходом от приближения чисто продольных волн к последовательному учету их квазипродольности [14]. Это существенно сказывается на характеристиках тензора деформации, сопоставляемого управляющему волновому процессу. В зависимости от НВС указанный тензор может обеспечить как наследование характеристик упругого поля ДЦЗ, так и заметные отличия, что связано с процессом флуктуационного преодоления межфазного барьера в области появления НВС. Важный вывод касается также связи между отношением модулей скоростей управляющих волн α и отношением $|\epsilon_1/\epsilon_2| = k_w^2$ величин деформаций растяжения ($\epsilon_1 > 0$) и сжатия ($\epsilon_2 < 0$), переносимых УВП, которое сводится к равенству $\alpha = k_w$ лишь для чисто продольных волн. Так, например, для случая волновых векторов, принадлежащих плоскости симметрии кубического кристалла,

$$k_w = (\alpha + \text{tg}\psi)/(1 - \alpha \text{tg}\psi), \quad (3)$$

где индекс w у параметра k_w показывает, что он задает координату из отношения деформаций в тензоре деформаций, связываемом с УВП. Угол ψ соответствует повороту собственных векторов ξ_{1w} и ξ_{2w} тензора деформации относительно волновых нормалей. Очевидно, что $k_w > \alpha$ (при $\psi > 0$), $k_w = \alpha$ (при $\psi = 0$) и $k_w < \alpha$ (при $\psi < 0$).

В-третьих, расширяется сфера применения динамической теории, включающей, наряду с анализом МП в сплавах железа, и переходы в сплавах с эффектом памяти формы [15-17].

Одной из ярких особенностей ОЦК-ГПУ перестройки в титане, (как и при В2-В19 МП в никелиде титана), может быть включение в ориентационные соотношения плоскости исходной фазы, испытывавшей наибо́льшую перестройку, инициированную УВП.

4. Заключение

Развитие динамической теории мартенситных превращений подтвердило, в основном, конструктивность предложенных ранее правил отбора ДЦЗ. Однако, интерпретация плоскости исходной фазы, входящей в межфазное ориентационное соотношение, как плоскости скольжения ДЦЗ, носит частный характер и не должна рассматриваться в качестве определяющего требования.

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

Литература

1. М.П. Kashchenko, V.G. Chashchina. Phys. Usp. **54**(4), 331 (2011). [М.П. Кащенко, В.Г. Чащина. УФН. **181**(4), 345 (2011).]
2. М.П. Kashchenko, V.G. Chashchina. Letters on Materials. **1**(1), 7 (2011). [М.П. Кащенко, В.Г. Чащина. Письма о материалах. **1**(1), 7 (2011).]
3. М.П. Kashchenko, V.G. Chashchina. Materials Science Forum. **738-739**, 3 (2013).
4. М.П. Kashchenko, V.G. Chashchina. Phys. Metals and Metallography. **114**(10), 821 (2013). [М.П. Кащенко, В.Г. Чащина. ФММ. **114**(10), 894 (2013).]

5. V. P. Vereshchagin., M.P. Kashchenko. Solid state physics. **33**(5), 1601 (1991). (in Russian) [М.П. Кашченко, В.Г. Чащина. ФТТ. **33**(5), 1601 (1991).]
6. M.P. Kashchenko. Wave Model of Martensite Growth upon the γ - α Transformation in Iron-Based Alloys, 2nd Ed. (NITs Regul. i Khaotich. Dinamika. Izhevsk. Inst. Komp'yuternykh Issledovaniy. Izhevsk. (2010) 280 p. (in Russian) [М.П. Кашченко. Волновая модель роста мартенсита при γ - α превращении в сплавах на основе железа. Изд. 2-е. испр. и дополн. М. Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", Ижевский институт компьютерных исследований. 2010. 280 с.]
7. M.P. Kashchenko, V.V. Letuchev, S.V. Konovalov, S.V. Neskoromnyi. Phys. Metals and Metallography. **76**(3), 300 (1993). [М.П. Кашченко, В.В. Летучев, С.В. Коновалов, С.В. Нескоромный. ФММ. **76**(1), 90 (1993).]
8. M.P. Kashchenko, A.V. Nefedov, V.P. Vereshchagin, V.V. Letuchev. Phys. Metals and Metallography. **85**(4), 392 (1998). [М.П. Кашченко, А.В. Нефедов, В.П. Верещагин, В.В. Летучев. ФММ. **85**(4), 25 (1998).]
9. M.P. Kashchenko, V.G. Chashchina, A.G. Semenoviyh. Physical mesomechanics. **6**(1), 95 (2003). (in Russian) [М.П. Кашченко, В.Г. Чащина, А.Г. Семеновых. Физическая мезомеханика. **6**(1), 95 (2003).]
10. M.P. Kashchenko, V.G. Chashchina, A.G. Semenoviyh. Physical mesomechanics. **6**(3), 37 (2003). (in Russian) [М.П. Кашченко, В.Г. Чащина, А.Г. Семеновых. Физическая мезомеханика. **6**(3), 37 (2003).]
11. M.P. Kashchenko, K.N. Dzhemilev, V.G. Chashchina. Science and Education of the Bauman MSTU. DOI: 10.7463/0113.0529309. (2013). (in Russian) [М.П. Кашченко, К.Н. Джемилев, В.Г. Чащина. Наука и образование: МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. DOI: 10.7463/0113.0529309. (2013).]
12. M.P. Kaschenko., V.G. Chaschina. Phys. Metals and Metallography. **105**(6), 537 (2008). [М.П. Кашченко, В.Г. Чащина. ФММ. **105**(6), 571 (2008).]
13. M.P. Kaschenko, V.G. Chaschina. Phys. Metals and Metallography. **106**(1), 14 (2008). [М.П. Кашченко, В.Г. Чащина. ФММ. **106**(1), 16 (2008).]
14. M. Kashchenko, V. Chashchina. Dynamic theory of γ - α martensitic transformation in iron-based alloys. Solving the problem of the formation of twinned martensite crystals. Saarbrucken, Germany: LAMBERT Academic Publishing. (2012) 120 p.
15. M.P. Kashchenko, V.G. Chashchina. Russian Physics Journal. **56**(5), 557 (2013). [М.П. Кашченко, В.Г. Чащина. Изв. Вузов. Физика. **56**(5), 65 (2013).]
16. M.P. Kashchenko, V.G. Chashchina. Russian Physics Journal. **56**(6), 647 (2013). [М.П. Кашченко, В.Г. Чащина. Изв. Вузов. Физика. **56**(6), 39 (2013).]
17. M.P. Kashchenko, V.G. Chashchina. Russian Physics Journal. **56**(7), 76 (2013). [М.П. Кашченко, В.Г. Чащина. Изв. Вузов. Физика. **56**(7), 76 (2013).]