

**Надежда Михайловна Кащенко<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет имени Б. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

\**nad.kashenko@yandex.ru*

## ДИСЛОКАЦИОННЫЕ ЦЕНТРЫ ЗАРОЖДЕНИЯ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО МАРТЕНСИТА С ГАБИТУСАМИ ВБЛИЗИ {112}

Формирование кристаллов поверхностного мартенсита с габитусами, близкими к {11-2}, наблюдавшимися в сплаве Fe-30Ni при ГЦК-ОЦК ( $\gamma$ - $\alpha$ )-перестройке, связывается с инициацией управляющего волнового процесса упругим полем сегментов прямоугольных дислокационных петель вдоль направлений  $\langle 1 \ -1 \ 0 \rangle$ . Петли лежат в плоскостях {111} и имеют векторы Бюргерса вдоль  $\langle 0 \ -1 \ 1 \rangle$ . Показано, что вычисленные ориентации нормалей к габитусным плоскостям и направления макросдвига согласуются с экспериментальными данными.

*Ключевые слова:* мартенситное превращение, поверхностный мартенсит, динамическая теория, центры зарождения, габитусные плоскости, направление макросдвига.

***Nadezhda M. Kashchenko***

Ural Federal University named after B. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

## DISLOCATION NUCLEATION CENTERS FOR SURFACE MARTENSITE WITH HABITS NEAR {112}

The formation of surface martensite crystals with habits close to {11-2}, observed in the Fe-30Ni alloy during the fcc-bcc ( $\gamma$ - $\alpha$ ) rearrangement, is associated with the initiation of the control wave process by the elastic field of segments of rectangular dislocation loops along the directions  $\langle 1 \ -1 \ 0 \rangle$ . The loops lie in the {111} planes and have Burgers vectors along  $\langle 0 \ -1 \ 1 \rangle$ . It is shown that the calculated orientations of normals to habit planes and macroshear directions are consistent with experimental data.

*Key words:* martensitic transformation, surface martensite, dynamic theory, nucleation centers, habit planes, macroshear direction.

Поверхностный мартенсит (ПМ) наблюдается обычно в прилегающем к поверхности образца слое после электролитической полировки. Температура начала превращения  $M_s$ , как правило, превышает стартовую температуру в объеме образца на некоторую величину  $\Delta$ . Для определенности здесь рассматривается ПМ, возникающий при  $\gamma$  -  $\alpha$  мартенситном превращении (МП) в сплавах на основе железа. В этом случае  $\Delta \approx (30 - 50)$  К. Напомним, что МП протекает кооперативным путем. Это означает наличие механизма управления формированием мартенситного кристалла, что отражается в существовании макроскопических морфологических признаков, однозначно

связанных между собой (габитусная плоскость, макросдвиг, межфазные ориентационные соотношения) [1]. В [2] для сплава Fe-30%Ni установлено, что габитусы ПМ близки к  $\{121\}_\gamma$ , а направления макросдвига **S** не лежат в плоскостях габитусов и близки к  $\langle 1-2 1 \rangle_\gamma$ . Попытка интерпретации этих данных в рамках кристаллогеометрического подхода [3] привела к выводу о неприменимости такого подхода к случаю ПМ. Дело в том, что методика [3] базируется на представлении о габитусе как макроскопически инвариантной плоскости. С этих позиций сравнительно успешной оказалось лишь описание габитусов типа  $\{3 10 15\}_\gamma$ , связывающее макроинвариантность габитуса с определенным соотношением двойников превращения тонкой (внутренней) структуры кристалла.

Динамическая теория МП (см., например, [4, 5]) использует концепцию управляющего волнового процесса (УВП). Представления о зародышах мартенсита заменяется представлением о начальном возбужденном состоянии (НВС), возникающем скачкообразно в определенных областях упругого поля дислокационных центров зарождения (ДЦЗ). Выделяющаяся энергия (преимущественно в виде колебаний) порождает пару относительно длинноволновых пучков (l-волны), наложение которых обеспечивает формирование габитусной плоскости. Важно, что ориентация габитуса не связана с тонкой структурой кристалла, главную роль в описании которой играют относительно коротковолновые s-смещения, действующие согласованно с l-волнами. В простейшем случае единичные векторы волновых нормалей квазипродольных l-волн  $\mathbf{n}_{1,2}$ , имеющих скорости  $\mathbf{v}_1$  и  $\mathbf{v}_2$ , совпадают с направлениями собственных векторов  $\xi_{1,2}$  тензора деформации упругого поля ДЦЗ, соответствующих собственным значениям  $\varepsilon_{1,2}$  деформации растяжения и сжатия ( $\varepsilon_1 > 0$ ,  $\varepsilon_2 < 0$ ). В результате, ориентация нормали к плоскости габитуса **N** задается простой линейной комбинацией  $\mathbf{n}_1$  и  $\mathbf{n}_2$ :

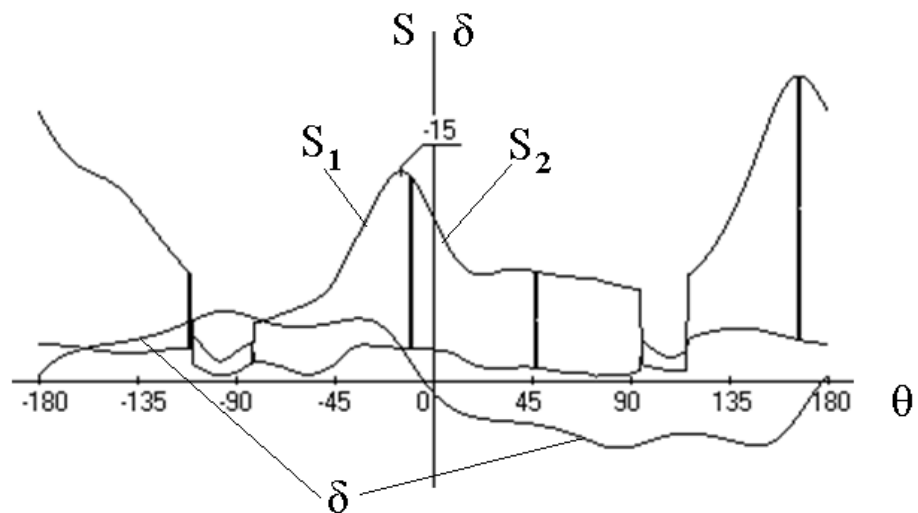
$$\mathbf{N} \parallel \mathbf{n}_2 \pm \alpha \mathbf{n}_1, \quad \alpha = \left| \frac{\mathbf{v}_2}{\mathbf{v}_1} \right| \approx \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{|\varepsilon_2|}}, \quad \mathbf{n}_{1,2} \approx \xi_{1,2}. \quad (1)$$

Таким образом, выбирая вектор Бюргерса и подходящую форму ДЦЗ, при известных экспериментальных значениях упругих модулей  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{44}$  кубического кристалла рассчитывается упругое поле ДЦЗ, а область НВС и одно из двух направлений **N** отбирается на основе требования максимума деформации сдвига **S**. Этот алгоритм приводит к хорошему согласию с экспериментальными данными и свободен от затруднений кристаллогеометрического подхода.

Полезно напомнить, что состав Fe-30%Ni относится к области, где могут сосуществовать кристаллы с габитусами, близкими к  $\{557\}$  типичными для пакетного мартенсита в форме реек и равноосные кристаллы с габитусами, близкими  $\{31015\}$ . Габитусам  $\{557\}$  естественно сопоставляются сегменты смешанных (60-градусных) дислокаций с линиями  $\Lambda_1 \parallel \langle 1 -1 0 \rangle$ , а габитусам  $\{31015\}$  – 30-градусные дислокации с линиями  $\Lambda_2 \parallel \langle 1 -2 1 \rangle$ . НВС имеет форму прямоугольного параллелепипеда вытянутого вдоль направления  $\xi_3$ , ортогонального к векторам  $\xi_{1,2}$ . Поэтому естественно в качестве ожидаемого ДЦЗ использовать прямоугольную дислокационную петлю с сегментами  $\Lambda_1$  и

$\Lambda_2$  и векторами Бюргера  $\mathbf{b} \parallel \langle 011 \rangle$ . Ясно, что при такой конфигурации ДЦЗ требуемая форма НВС будет возникать в области, относительно близкой к центральной части одного из сегментов ДЦЗ. Поэтому при расчетах упругого поля начало отсчета цилиндрической системы координат ( $Z=0, R=0$ ) связывается с центром одного из сегментов ДЦЗ, а угловая переменная  $\theta$  отсчитывается от плоскости петли. Упругие модули (в единицах ТПа) выбирались, согласно [6], для состава Fe-31Ni:  $C_{44} \approx 0.112$ ,  $C' = (C_{11} - C_{12})/2 \approx 0.027$ ,  $C_L = (C_{11} + C_{12} + 2C_{44})/2 \approx 0.218$ . Размеры сегментов задавались (в единицах параметра решетки ГЦК -  $\gamma$  фазы). Например, ниже приведены результаты при длинах  $\Lambda_1 = 7 \cdot 10^3$  и  $\Lambda_2 = 10^4$ .

На рисунке приведены данные расчета упругого поля ДЦЗ для конкретного случая  $\Lambda_1 \parallel [1-10]$ ,  $\Lambda_2 \parallel [11-2]$ ,  $\mathbf{b} \parallel [0-11]$  в масштабе, удобном для восприятия. Заметим, что из двух максимумов сдвига  $S_1$ , отбирающего нормаль  $\mathbf{N} \parallel \mathbf{n}_2 + \alpha \mathbf{n}_1$  в (1), предпочтение отдается максимуму при  $\theta \approx -15^\circ$ , поскольку  $\gamma$ - $\alpha$  МП идет с увеличением удельного объема, а этому максимуму соответствует большее значение относительного изменения объема  $\delta > 0$ . Приведем также



Зависимость от угла  $\theta$  величины сдвига  $S$  и относительного изменения объема  $\delta$ , при  $Z=0, R=1200$  (начало отсчета - центр сегмента  $\Lambda_1$ , вертикальные линии разделяют области доминирования сдвигов  $S_1$  либо  $S_2$ , параметры ДЦЗ указаны в тексте)

численные данные для единичных векторов характерных направлений при  $\theta = 15^\circ$ :  $\mathbf{N} \parallel [0.4133 \ 0.4125 \ 0.8118]$  ( $\approx 0.52^\circ$  от  $[112]$ );  $\mathbf{S}_1 \parallel [0.4075 \ 0.5389 \ -0.7372]$  ( $\approx 8.77^\circ$  от  $[11-2]$ );  $\xi_3 \parallel [-0.7812 \ 0.6186 \ 0.0834]$  ( $\approx 8.17^\circ$  от  $[-110]$ ).

Формирование поверхностного мартенсита с габитусами  $\{112\}$  обусловлено преимущественно влиянием сегментов  $\Lambda_1 \parallel \langle 1 \ -1 \ 0 \rangle$  ДЦЗ. Идентификация центров зарождения дает основу для описания других наблюдаемых особенностей ПВ. В частности, формирование ПВ с габитусами типа  $\{17 \ 14 \ 12\}$ , упомянутыми в [1], сопоставляется, главным образом, с влиянием упругих полей сегментов  $\Lambda_2 \parallel \langle 1 \ -2 \ 1 \rangle$  ДЦЗ.

*Автор выражает благодарность Министерству науки и высшего образования Российской Федерации за поддержку работы при исполнении программы развития Уральского федерального университета в рамках программы «Приоритет-2030» (проект 4.38).*

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Курдюмов Г.В. Превращения в железе и стали / Г.В. Курдюмов, Л.М. Утевский, Р.И. Энтин. М.: Наука, 1977. 236 с.
2. Klostermann J.A. The nucleation and growth of slow-growing martensite in Fe-30% Ni / J.A. Klostermann // Inter. Simpos. on the Mechanism of Phase Transfor. In Crist. Solids. July 1968. Univ. of Manchester. P. 143 – 151.
3. Wechsler M.S. On the theory of the formation of martensite / M.S.Wechsler, D.S. Lieberman, T.A. Read // Journal of Metals. 1953, november. P. 1503–1515.
4. Кащенко М.П. Волновая модель рост мартенсита при  $\gamma$ - $\alpha$  превращении в сплавах на основе железа / М.П. Кащенко. М.- Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», ИИКИ, 2010. 280 с.
5. Кащенко М.П. Динамическая модель сверхзвукового роста мартенситных кристаллов / М.П. Кащенко, В.Г. Чащина // УФН. 2011. Т. 181. № 4. С. 345-364.
6. Haush G. Single crystalline elastic constants of ferromagnetic face centered cubic Fe-Ni invar alloys / G. Haush, H. Warlimont // Acta Met. 1973. V.21. № 4. P. 401-414.

#### REFERENCES

1. Kurdyumov G.V. Transformations in iron and steel / G.V. Kurdyumov, L.M. Utevsky, R.I. Entin. M.: Nauka, 1977. 236 p.
2. Klostermann J.A. The nucleation and growth of slow-growing martensite in Fe-30% Ni / J.A. Klostermann // Inter. Simpos. on the Mechanism of Phase Transfor. In Crist. Solids. July 1968. Univ. of Manchester. P. 143 – 151.
3. Wechsler M.S. On the theory of the formation of martensite / M.S.Wechsler, D.S. Lieberman, T.A. Read // Journal of Metals. 1953, november. P. 1503–1515.
4. Kashchenko M.P. Wave model of martensite growth during  $\gamma$  -  $\alpha$  transformation in iron-based alloys / M.P. Kashchenko. M. - Izhevsk: Research Center "Regular and Chaotic Dynamics", ИКИ, 2010. 280 p.
5. Kashchenko M.P. Dynamic model of supersonic martensitic crystal growth / M.P.Kashchenko, V.G.Chashchina//Phys. Usp. 2011. V. 54. № 4. P. 331-349.
6. Haush G. Single crystalline elastic constants of ferromagnetic face centered cubic Fe-Ni invar alloys / G. Haush, H. Warlimont // Acta Met. 1973. V.21. № 4. P. 401-414.