

УДК 669.14:536.424

РЕЛАКСАЦИОННЫЙ ПОВОРОТ ПРИ МАРТЕНСИТНОМ ПРЕВРАЩЕНИИ И РАССЕЯНИЕ ТЕКСТУРЫ МАРТЕНСИТА

© 2023 г. В. М. Гундырев^{1,*}, В. И. Зельдович^{1,**}, академик РАН В. М. Счастливцев^{1,***}

Поступило 15.06.2022 г.

После доработки 15.06.2022 г.

Принято к публикации 10.10.2022 г.

В нашей кристаллографической теории мартенситного превращения появляется новая характеристика мартенситного превращения — релаксационный поворот, которого не было в общепринятой феноменологической теории мартенситного превращения. Релаксационный поворот необходим для получения инвариантной плоскости. Рассчитанный угол релаксационного поворота для сплавов железа с нетермоупругим мартенситом составляет 1.75–1.85 градуса, для термоупругих сплавов Гейслера с многослойным мартенситом — 0.19–0.36 градуса. Релаксационный поворот приводит к рассеянию текстуры мартенсита. Выполнено измерение углов рассеяния единичных рентгеновских отражений мартенсита в разных сплавах и установлено, что угол рассеяния соответствует углу релаксационного поворота. Этот результат показывает, что наша кристаллографическая теория мартенситного превращения описывает реальный механизм мартенситного превращения.

Ключевые слова: кристаллографическая теория мартенситного превращения, релаксационный поворот, рассеяние текстуры мартенсита

DOI: 10.31857/S2686740023010066, EDN: UNGUEE

В общепринятой феноменологической теории мартенситного превращения (ФТМП) деформация формы (макроскопический сдвиг) P_1 записывается как произведение трех матриц:

$$P_1 = RPB, \quad (1)$$

где B — чистая деформация решетки аустенита для получения решетки мартенсита (деформация Бейна), P — деформация мартенсита при инвариантной решетке, R — поворот мартенситной пластины [1, 2]. В предложенной нами [3] кристаллографической теории мартенситного превращения (КТМП) для описания деформации решетки взят реальный сдвиг Γ вместо гипотетической деформации Бейна. Сдвиг происходит по плоскости двойникования в направлении двойникования решетки аустенита и совпадает с первым сдвигом в двухсдвиговой схеме образования мартенсита Курдюмова—Закса [4]. Для получения решетки мартенсита сдвиг необходимо дополнить деформацией сжатия-растяжения B_1 вдоль трех

взаимно перпендикулярных направлений, образованных направлением сдвига, нормалью к плоскости сдвига и поперечным направлением. В КТМП деформация формы записывается как произведение четырех матриц:

$$P_1 = R_1PB_1\Gamma, \quad (2)$$

где произведение $B_1\Gamma$ — деформация решетки, P — деформация при инвариантной решетке, такая же, как в ФТМП, R_1 — относительно небольшой поворот кристалла мартенсита, по сравнению с поворотом R в ФТМП, для получения инвариантной плоскости. Этот поворот мы назвали релаксационным [3].

В ФТМП деформацию решетки при мартенситном превращении разделяют на чистую деформацию B (деформацию Бейна) и вращение R . Чистая деформация решетки вычисляется из параметров решеток аустенита и мартенсита. Вращение R мартенситной пластины определяется из условия получения инвариантной плоскости. При расчетах по ФТМП угол ϕ поворота R мартенситной пластины получается достаточно большим. Например, для сплава Fe-31%Ni он равен 9.8 градуса [3]. Такой большой угол указывает на то, что деформация решетки при мартенситном превращении идет сдвиговым путем. Это обстоятельство учитывается в КТМП, и поэтому для деформации решетки используется сдвиг Γ . В этом случае угол ϕ поворота R_1 равен 1.75 градуса [3]. Как видим,

¹ Институт физики металлов им. М.Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, Россия

*E-mail: gundyrev@imp.uran.ru

**E-mail: zeldovich@imp.uran.ru

***E-mail: schastliv@imp.uran.ru

Таблица 1. Значения сдвигов и угла релаксационного поворота для сплавов с термоупругим (сплавы 1–4) и нетермоупругим (сплавы 5–7) мартенситным превращением

№	1	2	3	4	5	6	7
Сплав	Ni ₅₁ Mn ₂₄ Ga ₂₅	Ni ₆₃ Al ₃₇	Ni ₄₇ Mn ₄₂ In ₁₁	Ti ₄₉ Ni ₅₁	Fe–1.75C	Fe–31Ni	37ХН3А
g ₀	0.133	0.159	0.185	0.177	0.275	0.354	0.354
g	0.092	0.111	0.126	0.070	0.221	0.272	0.276
g ₁	0.092	0.107	0.127	0.141	0.172	0.226	0.225
φ, град	0.19	0.28	0.36	1.04	1.56	1.75	1.85

g₀ – величина сдвига при деформации Г решетки аустенита (Курдюмовский сдвиг), g – величина сдвига при деформации Р мартенсита, g₁ – величина сдвига при деформации формы Р₁, φ – угол релаксационного поворота R₁ пластины мартенсита.

угол φ поворота мартенситного кристалла R₁ в КТМП много меньше, чем R в ФТМП, но, тем не менее, он не равен нулю. Отсюда следует, что для получения инвариантной плоскости при мартенситном превращении требуется дополнительное вращение мартенситной пластины R₁. Таким образом, в КТМП появляется новая характеристика мартенситного превращения – релаксационный поворот, которой не было в общепринятой ФТМП.

Цель настоящей работы – сравнить угол релаксационного поворота в разных сплавах, установить факторы, влияющие на величину этого угла, а также получить экспериментальное подтверждение реальности описания механизма мартенситного превращения с помощью КТМП. В работе впервые показано, что угол рассеяния текстуры единичных рентгеновских отражений мартенсита в разных сплавах соответствует рассчитанному углу релаксационного поворота.

В табл. 1 представлены сводные данные значений сдвигов и угла релаксационного поворота, полученные нами в КТМП для сплавов с термоупругим и нетермоупругим мартенситным превращением [3, 5, 6].

Из табл. 1 видно, что при постепенном увеличении значений деформации решетки g₀ постепенно увеличивается деформация макросдвига g₁. Но угол релаксационного поворота φ увеличивается скачкообразно при переходе от термоупругих сплавов (1–3) к нетермоупругим с многослойным мартенситом (5–7). Никелид титана (сплав 4) занимает промежуточное положение. Значит, величина угла релаксационного поворота зависит от деформации сдвига, но, главным образом, от типа мартенситного перехода. Этот результат важен, так как показывает, что при больших значениях (более 1.5 градуса) угла релаксационного поворота исчезает термоупругость, значит, наруша-

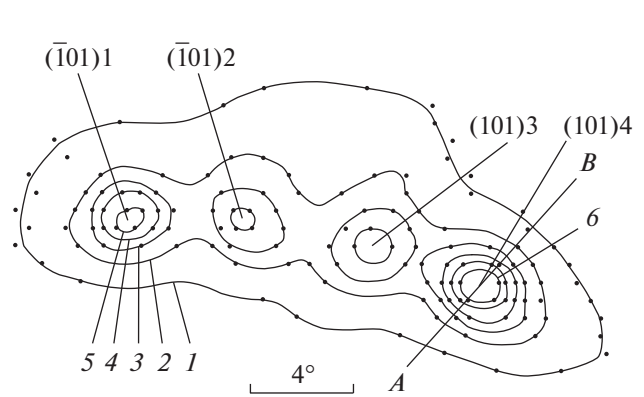


Рис. 1. Фрагмент экспериментальной полюсной фигуры {110} мартенсита с текстурными максимумами (101)1, (101)2, (101)3, (101)4. Цифры после индексов указывают номера ориентировок, сталь 37ХН3А.

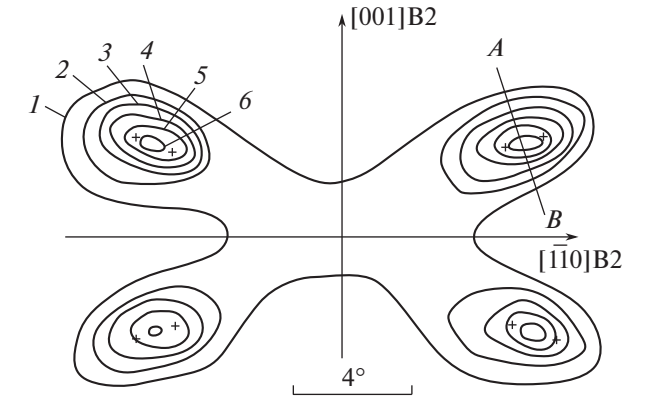


Рис. 2. Распределение полюсов (111) и (111) B19'-мартенсита на месте полюса (110) B2-фазы, сплав Ti₄₉Ni₅₁. Идеальные ориентировки показаны крестиками.

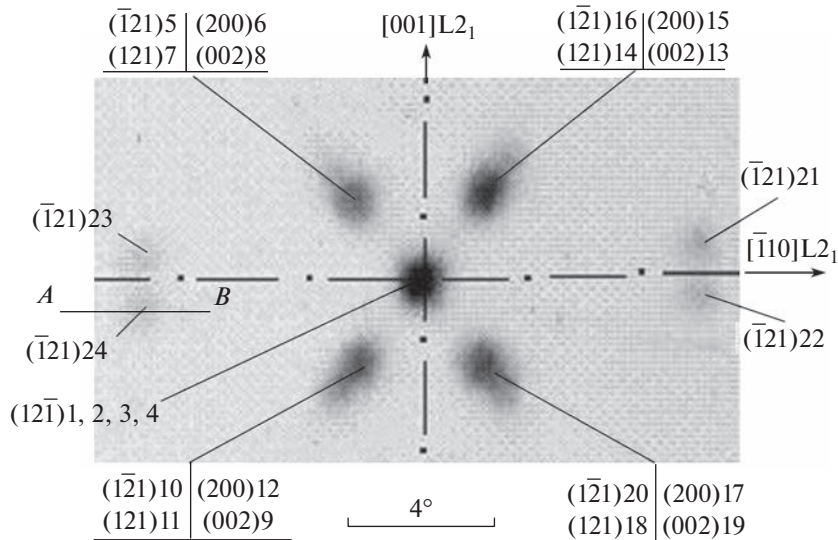


Рис. 3. Рентгеновский снимок текстурных максимумов мартенсита, полученных в окрестностях полюса $(220)L_{21}$. Цифры после индексов соответствуют номерам эквивалентных ориентировок. Сплав $Ni_{47}Mn_{42}In_{11}$.

ются пути обратимого перемещения атомов при обратном мартенситном превращении [4, 7].

Релаксационный поворот мартенситной пластины происходит в конце мартенситного превращения, когда мартенситная пластина уже получила наклеп от деформации мартенсита при инвариантной решетке в виде системы двойников. Для того чтобы повернуть мартенситную пластину с сохранением ее формы, необходимо задействовать несколько систем скольжения или двойникования. Однако легких систем скольжения или двойникования в мартенситной пластине уже нет из-за структурных дефектов, возник-

ших при деформации **P**. Поэтому релаксационный поворот кристалла мартенсита создает упругие напряжения, которые приводят к упругим изгибам решетки мартенсита. Изгиб кристаллографических плоскостей вызовет рассеяние текстурных максимумов мартенсита. Чем больше угол релаксационного поворота, тем больше изгиб плоскостей и рассеяние текстуры мартенситных пиков. По всей видимости, при значениях угла релаксационного поворота около 1.5 градуса и более упругая деформация сопровождается пластической. Можно предположить, что остаточные упругие напряжения второго рода и рассеяние текстуры в мартенсите являются результатом релаксационного поворота мартенситных пластин.

Рассеяние текстуры было исследовано по полюсным фигурам и по рефлексам на лауэграммах. На рис. 1 и 2 представлены фрагменты полюсных фигур мартенсита для монокристаллов стали 37ХН3А и сплава $Ti_{49}Ni_{51}$.

Видно, что рассеяние текстуры в стали больше, чем в никелиде титана. В сплаве $Ni_{47}Mn_{42}In_{11}$ с модулированной структурой мартенсита рассеяние текстуры было измерено по лауэграмме. На рис. 3 представлен фрагмент лауэграммы, полученной с одного зерна закаленного образца сплава $Ni_{47}Mn_{42}In_{11}$ [6].

Видно, что рассеяние рефлексов еще меньше, чем в никелиде титана. Лауэграммы, приведенные в [8, 9] для сплавов $Ni-37.0at\%Al$ и $Ni-Mn-Ga$, имеют аналогичное небольшое рассеяние рефлексов.

Для сопоставления величины угла релаксационного поворота с рассеянием единичных ре-

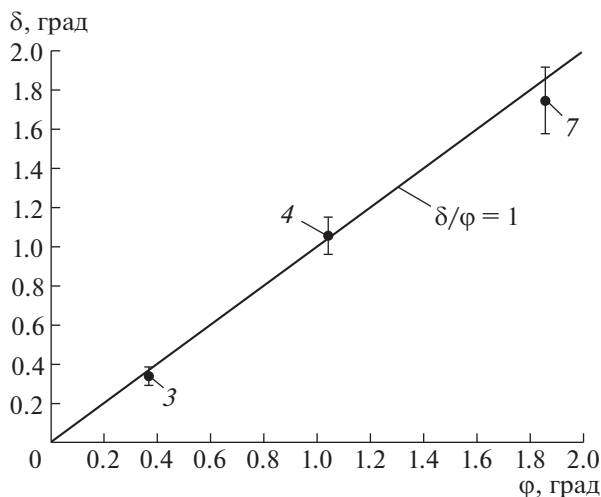


Рис. 4. Зависимость рассеяния текстуры мартенсита δ от величины угла релаксационного поворота φ . Цифры указывают номер сплава из табл. 1.

Таблица 2. Углы релаксационного поворота φ и углы рассеяния текстуры δ

Сплав	Ni ₄₇ Mn ₄₂ In ₁₁	Ti ₄₉ Ni ₅₁	37ХН3А
φ , град	0.36	1.04	1.85
δ , град	0.33	1.06	1.74

флексов мартенсита была определена полуширина рефлексов на половине высоты. Был измерен профиль интенсивности рефлексов вдоль линий АВ, указанных на рисунках; затем учтено инструментальное уширение рефлексов и выполнен расчет физического уширения по стандартной методике [10]. В табл. 2 и на рис. 4 представлены данные сравнения углов релаксационного поворота φ и углов рассеяния текстуры δ . В пределах погрешности 10% эти углы равны.

Полученный результат важен, так как, во-первых, является экспериментальным подтверждением расчетов по КТМП, а во-вторых, показывает, что расчетным путем по КТМП можно оценить рассеяние текстуры в мартенсите.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в рамках государственного задания по темам “Структура” г.р. № 122021000033-2 и “Давление” г.р. № 122021000032-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wechsler M.S., Lieberman D.S., Read T.A.* On the Theory of the Formation of Martensite // *Trans. AIME*. 1953. V. 197. P. 1503–1515.
2. *Wayman C.M.* Introduction to the Crystallography of Martensitic Transformations. N.Y.–L., 1964. 193 p.
3. *Гундырев В.М., Зельдович В.И., Счастливцев В.М.* Кристаллографический анализ и механизм мартенситного превращения в сплавах железа // *ФММ*. 2020. Т. 121. № 11. С. 1142–1161.
4. *Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И.* Превращения в железе и стали. М.: Наука, 1977. 238 с.
5. *Гундырев В.М., Зельдович В.И.* Кристаллографический анализ и механизм термоупругого мартенситного превращения в сплавах Гейслера с семислойной структурой мартенсита // *ФММ*. 2022. Т. 123. № 1. С. 27–34.
6. *Гундырев В.М., Калетина Ю.В.* Кристаллографический анализ и механизм мартенситного превращения в сплаве Гейслера Ni₄₇Mn₄₂In₁₁ // *ФММ*. 2019. Т. 120. № 11. С. 1193–1199.
7. *Лободюк В.А., Эстрин Э.И.* Мартенситные превращения. М.: Физматлит, 2009. 351 с.
8. *Murakami Y., Otsuka K., Hanada S., Watanabe S.* Self-accommodation and morphology of 14M (7R) martensites in an Ni-37.0at%Al alloy // *Materials Science and Engineering*. 1994. A189. P. 191–199.
9. *Martynov V.V.* X-ray diffraction study of thermally and stress-induced phase transformations in single crystalline Ni–Mn–Ga alloys // *J. Phys. IV (Paris)*. 1995. V. 5. P. 8–91.
10. *Тейлор А.* Рентгеновская металлография. М.: Металлургия, 1965. 663 с.

RELAXATION ROTATION DURING MARTENSITIC TRANSFORMATION AND SCATTERING OF MARTENSITE TEXTURE

V. M. Gundyrev^a, V. I. Zel'dovich^a, and Academician of the RAS V. M. Schastlivtsev^a

^a M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

In the our crystallographic theory of martensitic transformation, a new characteristic of martensitic transformation appears – a relaxation rotation, which was not in the generally accepted phenomenological theory of martensitic transformation. The relaxation rotation is necessary to obtain an invariant plane. The calculated angle of relaxation rotation for iron alloys with non-thermoelastic martensite is 1.75–1.85 degrees, for thermoelastic Geisler alloys with multilayer martensite 0.19–0.36 degrees. The relaxation rotation leads to the scattering of the texture of martensite. The scattering angles of single X-ray reflections of martensite in different alloys were measured and it was found that the scattering angle corresponds to the angle of relaxation rotation. This result shows that the our crystallographic theory of martensitic transformation describes the real mechanism of martensitic transformation.

Keywords: crystallographic theory of martensitic transformation, relaxation rotation, scattering of martensite texture