

Академик Г. В. КУРДЮМОВ, Л. К. МИХАЙЛОВА, А. Г. ХАЧАТУРЯН

АНОМАЛЬНО ВЫСОКАЯ ТЕТРАГОНАЛЬНОСТЬ МАРТЕНСИТА С БОЛЬШИМ СОДЕРЖАНИЕМ НИКЕЛЯ И ПРИРОДА АНОМАЛИЙ ТЕТРАГОНАЛЬНОСТИ

1. Многочисленными рентгенографическими исследованиями было установлено, что отношение осей c/a объемноцентрированной тетрагональной решетки мартенсита определяется содержанием углерода в исходном аустените ⁽¹⁾ и практически не зависит от наличия легирующих элементов ⁽²⁾. Зависимость c/a от концентрации углерода в твердом растворе может быть описана соотношением

$$c/a = 1 + \gamma p, \quad (1)$$

где p — содержание углерода, вес. %, γ — коэффициент, равный $0,046 \pm 0,001$.

Исследования кристаллической структуры мартенсита, образующегося при охлаждении ниже 0°C аустенита марганцевых, рениевых и простых углеродистых сталей, привели Л. И. Лысака с сотрудниками ⁽³⁻⁷⁾ к обнаружению «аномальной» тетрагональной решетки (κ' -мартенсита), величина c/a которой значительно ниже значений, соответствующих соотношению (1). При нагреве до комнатной температуры отношение осей растет, однако не достигает значений, вытекающих из уравнения (1).

Применение монокристаллов аустенита позволило, кроме того, установить, что периоды a и b объемноцентрированной решетки не равны, т. е. что «аномальная» решетка мартенсита является ромбической ^(6, 7).

Естественным объяснением образования аномальной решетки является предположение, что в силу каких-то особенностей механизма формирования кристаллов мартенсита не все атомы углерода оказываются в октаэдрических междоузлиях в рядах параллельных только оси c решетки мартенсита. Были предложены два различных механизма образования подобного распределения атомов углерода ^(8, 9).

Однако недавно было обнаружено, что существуют отклонения величины c/a не только в сторону уменьшения, но также в сторону увеличения от значений, предписываемых уравнением (1). Аномально высокие величины c/a наблюдались в мартенсите алюминиевых ^(10, 11) и высоконикелевых сталей ⁽¹²⁾.

В настоящей статье сообщаются некоторые данные об аномально высоких значениях c/a тетрагональной решетки мартенсита высоконикелевых сталей, полученные при исследовании явлений перераспределения атомов углерода в решетке твердого раствора при низких температурах. Химический состав исследованных сталей приведен в табл. 1 *.

Образцы закалывались в воде от температуры $1100-1150^\circ\text{C}$ и подвергались травлению для удаления обезуглероженного слоя. Мартенситная точка сталей была ниже 0° . Исследовалась кристаллическая решетка мартенсита, образовавшегося при охлаждении образцов в жидком азоте **. Рентгенограммы снимались в низкотемпературной камере при -160°C непосредственно после охлаждения для изучения решетки свежесформованного мартенсита. Измерения отношения осей и периодов решетки произво-

* Стали 1, 4-6 были предоставлены И. Я. Георгиевой, за что авторы выражают ей благодарность.

** В проведении экспериментов принимала участие Л. А. Кудрявцева.

дилось по линиям дублета (011)–(110) на рентгенограммах, снятых на расстоянии 157 мм от образца до фотопленки. Угловое положение их определялось с помощью эталона, которым служило α -железо, период решетки которого принимался равным 2,866 Å.

В табл. 1 содержатся результаты измерения величины периода a и отношения осей c/a . В последней графе приведены значения c/a , рассчитанные по формуле (1). Эти же результаты представлены на рис. 1. Там же приведены данные из работ ^(12, 13).

2. Тетрагональная симметрия решетки мартенсита объясняется преимущественным размещением атомов углерода в одной из трех подрешеток октаэдрических междоузлий (о.м.) о.ц.к.-решетки α -железа, т. е. в рядах, параллельных оси c . Чем больше концентрация углерода, тем выше отношение осей c/a тетрагональной решетки, т. е. тем больше «степень тетрагональности» мартенсита. Предполагается, что в свежеобразованном мартенсите весь углерод размещается в одной подрешетке и, следовательно, измеряемая для такого мартенсита величина c/a является максимальной для данной концентрации углерода в стали. Такое представление следовало из того, что в результате однородной деформации при бездиффузионной перестройке все атомы углерода, находившиеся в октаэдрических междоузлиях гранецентрированной решетки, должны попадать в одну и ту же подрешетку о.м. объемноцентрированной решетки ⁽⁵⁾.

Однако непосредственные данные о положении атомов углерода в решетке мартенсита не могли быть получены вследствие малой рассеивающей способности атомов углерода и сравнительно малой их концентрации в стали. Применение нейтронографического анализа с использованием слабоборассеивающего изотопа ⁵⁷Fe и изотопа ⁶²Ni с отрицательной амплитудой

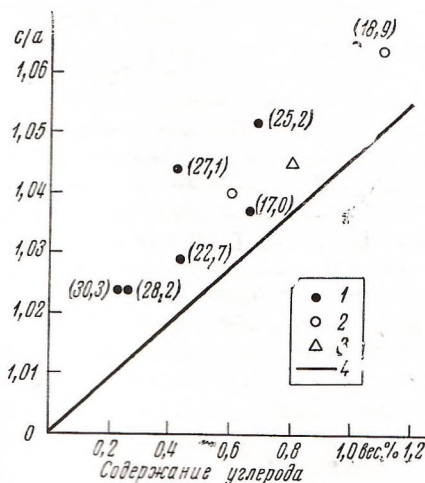


Рис. 1. Отношение осей c/a тетрагональной решетки мартенсита никелевых сталей: 1 — наши данные (в скобках указано содержание никеля), 2 — данные ⁽¹²⁾, 3 — данные ⁽¹³⁾, 4 — прямая $c/a = 1 + 0,046 p$

Таблица 1

№№ п.п.	Химический состав, %		a , Å	c/a	c/a по (1)
	C	Ni			
1	0,23	30,3	2,847	1,024	1,011
2	0,26	28,2	2,853	1,024	1,012
3	0,43	22,7	2,849	1,029	1,020
4	0,44	27,1	2,837	1,044	1,020
5	0,68	17,0	2,856	1,037	1,031
6	0,66	25,2	2,835	1,052	1,030
7	1,02	18,9	2,830	1,065	1,047

рассеяния нейтронов позволило однозначно установить, что атомы углерода занимают октаэдрические междоузлия ⁽¹⁴⁾. При этом оказалось, что в решетке мартенсита с 1,5 вес. % углерода и 8 % никеля с отношением осей $c/a = 1,07$, соответствующим зависимости (1), значительная доля атомов углерода (не более 20 %) не находится в основной подрешетке о.м., т. е. в рядах, параллельных оси c .

Этот результат позволяет понять полученные аномально высокие величины c/a . Можно думать, что в указанных алюминиевых и никелевых сталях весь или почти весь углерод размещается только в одной подрешетке октаэдрических междоузлий.

Причины большей или меньшей степени преимущественного заполнения атомами углерода основной подрешетки о.м. должны тогда определяться различием в механизме формирования кристаллов мартенсита в аустенитной матрице.

Для объяснения аномально малых величин c/a в марганцевых и других сталях Ройтбурд и Хачатурян⁽⁹⁾ выдвинули гипотезу, по которой уменьшение доли атомов углерода в основной подрешетке о.м. обусловливается возникновением в процессе ($\gamma \rightarrow \alpha$)-перестройки двойников по плоскости (011) тетрагональной решетки, параллельной плоскости (111) аустенита. Атомы углерода в двойниках оказываются в о.м. в рядах почти параллельных осей [010] решетки матрицы, т. е. диагональной оси, не лежащей в плоскости двойникового. Если двойники достаточно тонки, то такой внутренне двойникованный кристалл мартенсита должен когерентно рассеивать рентгеновские лучи и давать дифракционную картину, соответствующую одному кристаллу ромбической симметрии с усредненными периодами решетки a , b , и c . Отношение осей c/b должно зависеть от отношения суммарного объема двойников к объему матрицы. Период a должен при этом оставаться почти неизменным. Такое положение имеет место в марганцевых сталях⁽⁷⁾.

Эта же гипотеза может быть привлечена и для объяснения обнаруженного нейтронографически факта размещения только части атомов углерода в основной подрешетке о.м. в сталях с нормальной тетрагональностью и для объяснения «аномально» высоких значений c/a в алюминиевых и никелевых сталях. Максимальные величины c/a для данного содержания углерода в стали должны с этой точки зрения наблюдаться в тех случаях, когда двойникование по плоскости (011) мартенсита в процессе формирования мартенсита отсутствует. Периоды a и b должны быть при этом равны. Отсутствие ромбичности действительно наблюдалось в алюминиевых сталях с аномально высоким c/a ⁽¹¹⁾.

Степень отклонения решетки мартенсита от тетрагональной с максимальным c/a будет обуславливаться тогда степенью склонности стали при данном легировании к образованию двойников по (011)_м. Можно предполагать, что последняя должна зависеть от энергии дефектов упаковки в аустените, которая в свою очередь зависит от химического состава и степени порядка в размещении атомов разных сортов в аустените.

Таким образом, предложенный в⁽⁹⁾ механизм позволяет с единой точки зрения объяснить особенности размещения атомов углерода в решетке мартенсита различных сталей.

Институт металловедения и физики металлов
Центрального научно-исследовательского
института черной металлургии
им. И. П. Бардина
Москва

Поступило
12 XII 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Г. В. Курдюмов, Явления закалки и отпуска стали, 1960. ² Z. Nishiyama, M. Doi, J. Japan Inst. Metals, v. 8, 305 (1944). ³ Л. И. Лысак, Я. Н. Вовк, Физ. мет. и металловед., т. 20, 540 (1965). ⁴ Л. И. Лысак, Л. О. Андрушик, Там же, т. 28, 348 (1969). ⁵ G. V. Kurdjumov, Mém. Sci. Rev. Mét., v. 67, 755 (1970); J. Less - Common Metals, v. 28, 153 (1972). ⁶ Л. И. Лысак, Я. Н. Вовк и др., Физ. мет. и металловед., т. 24, 299 (1967). ⁷ Л. И. Лысак, Ю. М. Кондратьев, Ю. М. Полищук, Там же, т. 36, 546 (1973). ⁸ Л. И. Лысак, Б. И. Николин, Там же, т. 22, 730 (1966). ⁹ А. Л. Ройтбурд, А. Г. Хачатурян, Там же, т. 30, 1189 (1970). ¹⁰ M. Watanabe, C. M. Wayman, Scripta Met., v. 5, 109 (1971). ¹¹ Л. И. Лысак, А. Г. Драчинская, Н. И. Сторчак, Физ. мет. и металловед., т. 34, 84 (1972). ¹² Л. И. Лысак, С. А. Артемюк, Ю. М. Полищук, Там же, т. 35, 1098 (1973). ¹³ M. Watanabe, C. M. Wayman, Met. Trans., v. 2, 2228 (1971). ¹⁴ И. Р. Энгин, В. А. Соменков, С. Ш. Шильштейн, ДАН, т. 206, 1096 (1972).