

- [17] Sakabe S., Izawa Y. // Phys. Rev. A. 1992. Vol. 45. N 3. P. 2086.  
[18] Waszink J.H. // J. Appl. Phys. 1975. Vol. 46. N 7. P. 3139–3145.  
[19] Биберман Л.М., Воробев В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М., Наука, 1982. 376 с.  
[20] Излучательные свойства твердых материалов / Под ред. А.Е.Шейндлина. М.: Энергия, 1974. 472 с.

## ЦЕНТРЫ ЗАРОЖДЕНИЯ И ПРЕИМУЩЕСТВЕННЫЕ ОРИЕНТИРОВКИ МАРТЕНСИТНЫХ КРИСТАЛЛОВ ПРИ СПЕЦИАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ ОХЛАЖДЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ АУСТЕНИТА

© С.В.Коновалов, Т.Н.Яблонская, М.П.Кашенко

Уральская государственная лесотехническая академия,  
620032 Екатеринбург, Россия  
(Поступило в Редакцию 8 февраля 1996 г.)

Зарождение мартенсита при реконструктивных превращениях с выраженными признаками перехода I рода имеет гетерогенную природу. Типичными проблемами при изучении стадии зарождения новой фазы являются вопросы об идентификации дефекта, играющего роль центра зарождения, и о включении самого дефекта в объем зародыша. Применительно к  $\gamma \rightarrow \alpha$  мартенситному превращению в сплавах на основе железа показано [1,2], что роль центров зарождения могут играть уже отдельные прямолинейные дислокации, упругие поля которых медленнее других убывают в пространстве. Зарождение мартенситных кристаллов (МК) происходит во вполне определенных областях упругого поля дислокации, нарушающего исходную симметрию решетки. Таким образом, дислокация не принадлежит объему зародыша и играет роль силового центра.

Начальная стадия мартенситного превращения характеризуется формированием сильновозбужденного состояния кристалла в форме вытянутого параллелепипеда [2]. Подход к ее описанию существенно отличается от традиционных представлений о термодинамически равновесном зародыше. В частности, для сплавов Fe — 30–34% Ni имеются веские основания [2] считать центрами зарождения 30°-ной дислокации с линиями  $\langle 112 \rangle$  и плоскостями скольжения  $\{111\}$  (здесь и далее обозначения всех кристаллографических направлений и плоскостей приводятся в базисе исходной  $\gamma$ -фазы).

Существует интересная возможность косвенной экспериментальной проверки этого вывода. Речь идет об анализе картины следов МК, возникающей при локальном охлаждении монокристаллов аустенита с поверхностей: (001), (110) и (111) и при условии, что образцы вырезаны в виде пластин с наименьшим размером в направлении нормали к охлаждаемой “лицевой” поверхности.

Таблица 1. Ожидаемые преимущественные ориентировки МК при локальном охлаждении поверхности (001)

Линия дислокации	Плоскость скольжения	Направление вектора Бюргерса	Тип дислокации	Габитусная плоскость
[112]	(11 $\bar{1}$ )	[1 $\bar{1}$ 0]	Краевая	-
		[101]	30°	(15 3 $\bar{1}$ 0)
		[011]	30°	(3 15 $\bar{1}$ 0)
$\bar{1}$ 12]	(1 $\bar{1}$ 1)	[011]	30°	(3 $\bar{1}$ 5 10)
		[110]	Краевая	-
		[10 $\bar{1}$ ]	30°	(15 $\bar{3}$ 10)
[1 $\bar{1}$ 2]	$\bar{1}$ (11)	[110]	Краевая	-
		[101]	30°	( $\bar{1}$ 5 3 10)
		[01 $\bar{1}$ ]	30°	( $\bar{3}$ 15 10)
[11 $\bar{2}$ ]	(111)	[ $\bar{1}$ 01]	30°	(15 3 10)
		[01 $\bar{1}$ ]	30°	(3 15 10)
		[1 $\bar{1}$ 0]	Краевая	-

Поскольку дислокационная линия должна быть либо замкнутой, либо оканчивающейся на дефектах, а поверхность образца является макроскопическим дефектом, то прямолинейные отрезки дислокаций могут располагаться между гранями образца. Для монокристалла в форме пластинки, толщина которой существенно меньше размеров "лицевой" поверхности, вероятность реализации прямолинейных отрезков дислокационных линий окажется наибольшей для линий с ориентировкой приближенной к нормали "лицевой" грани образца. Очевидно, что если эта грань совпадает, например, с кристаллографической плоскостью (001), то некоторые из набора линий  $\langle 112 \rangle$  (а именно [112], [ $\bar{1}$ 12], [ $\bar{1}$ 1 $\bar{2}$ ], [ $\bar{1}$ 1 $\bar{2}$ ], с фиксированной позицией индекса, равного 2) составят наименьший угол с нормалью [001] и окажутся вероятными ориентировками центров зарождения первых МК, возникающих в этом образце при охлаждении. Тогда по правилам [1] сопоставления центров зарождения и габитусных плоскостей образующихся МК можно ожидать появления первых наиболее мощных следов МК на поверхности (001) образца, соответствующих всего восьми плоскостям (табл. 1) из полного набора 24 габитусов типа {3 15 10}.

На поверхности (001), следовательно, должны быть выделены в силу симметрии четыре ориентировки следов МК (каждый след оказывается двукратно вырожденным, так как ему соответствуют сразу две габитусные плоскости).

Аналогично в случае охлаждаемых поверхностей (110) и (111) можно ожидать (табл. 2 и 3) первоначальное появления кристаллов восьми и шести ориентировок соответственно.

Эксперименты проводились на монокристаллических образцах, близких по составу Fe-30%Ni (табл. 4) и кратко освещались в [3]. Анализ ориентации следов МК на "лицевых" поверхностях (001) и (111) показал, что в целом имеется хорошее (в пределах ошибки эксперимента, не превышающей  $\pm 2^\circ$ ) соответствие между полным набором

Таблица 2. Ожидаемые преимущественные ориентировки МК при локальном охлаждении поверхности (110)

Линия дислокации	Плоскость скольжения	Направление вектора Бюргерса	Тип дислокации	Габитусная плоскость
[211]	$(\bar{1}11)$	[110]	30°	$(\bar{1}0\ 15\ 3)$
		[101]	30°	$(\bar{1}0\ 3\ 15)$
		[01 $\bar{1}$ ]	Краевая	—
[21 $\bar{1}$ ]	$(1\bar{1}1)$	[110]	30°	$(10\ \bar{1}5\ 3)$
		[011]	Краевая	—
		[10 $\bar{1}$ ]	30°	$(10\ \bar{3}\ 15)$
[121]	$(1\bar{1}1)$	[110]	30°	$(15\ \bar{1}0\ 3)$
		[10 $\bar{1}$ ]	Краевая	—
		[011]	30°	$(3\ \bar{1}0\ 15)$
[12 $\bar{1}$ ]	$(\bar{1}11)$	[110]	30°	$(\bar{1}5\ 10\ 3)$
		[01 $\bar{1}$ ]	30°	$(\bar{3}\ 10\ 15)$
		[101]	Краевая	—

Таблица 3. Ожидаемые преимущественные ориентировки МК при локальном охлаждении поверхности (111)

Линия дислокации	Плоскость скольжения	Направление вектора Бюргерса	Тип дислокации	Габитусная плоскость
[211]	$(\bar{1}11)$	[01 $\bar{1}$ ]	Краевая	—
		[101]	30°	$(\bar{1}0\ 3\ 15)$
		[110]	30°	$(\bar{1}0\ 15\ 3)$
[112]	$(1\bar{1}\bar{1})$	[011]	30°	$(3\ 15\ \bar{1}0)$
		[1 $\bar{1}$ 0]	Краевая	—
		[101]	30°	$(15\ 3\ \bar{1}0)$
[121]	$(1\bar{1}1)$	[1 $\bar{1}$ 0]	Краевая	—
		[110]	30°	$(15\ \bar{1}0\ 3)$
		[011]	30°	$(3\ \bar{1}0\ 15)$

ожидаемых и наблюдаемых ориентировок следов МК для приведенных в табл. 5 значений габитусных индексов. Охлаждение поверхности (110) обнаружило характерную особенность вероятности наблюдения следов МК, выражающуюся в неравноправии четырех ориентировок из набора возможных, а именно следы, соответствующие габитусам  $(\bar{1}0\ 15\ 3)$ ,  $(15\ \bar{1}0\ 3)$  и также  $(10\ \bar{1}5\ 3)$ ,  $(\bar{1}5\ 10\ 3)$ , встречаются существенно реже остальных. Можно дать качественное объяснение этого факта, допуская, что в направлении нормали к охлаждаемой поверхности действует напряжение сжатия. Поскольку позиции наибольшего индекса габитусной плоскости соответствует направлению оси растяжения, позиции среднего — главной оси сжатия, а наименьшего — побочной оси сжатия, то в случае ориентировки оси сжимающего напряжения в направлении [110] наибольшие индексы габитусов МК, обладающих преимуществом при зародышеобразовании, должны

Таблица 4. Химический анализ превращенных образцов

Охлаждаемая поверхность	Химический состав, ат.%	
	Fe	Ni
(001)	71.0	29.0
(110)	70.5	29.5
(111)	70.3	29.7

Таблица 5. Металлографический анализ следов МК в превращенных монокристаллах

Анализируемые поверхности образцов	Габитусные индексы, вычисленные по следам МК		
	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
(001)	3	8.101	12.625
(110)	3	7.757	11.996
(111)	3	7.586	12.105

оказаться на третьей позиции. Объяснение сжимающего напряжения требует специального исследования, однако ясно, что оно может быть связано как с поверхностным натяжением, так и с магнитоупругим взаимодействием. Отсутствие подобных особенностей при охлаждении поверхности (001) не противоречит данному предположению, так как все ожидаемые ориентировки, указанные в табл. 1, совпадают с ориентировками, для которых направление [001] является направлением сжатия. Что касается ориентировок МК при охлаждении образца с поверхности (111), то независимо от характера (сжатие или растяжение) одноосного напряжения вдоль нормали к поверхности его действие не может привести к ориентационному эффекту описанного типа в силу полного равноправия всех ориентаций осей симметрии четвертого порядка по отношению к направлению [111].

Полученный результат косвенно свидетельствует в пользу концепции дислокационного зарождения мартенсита в сплавах данного состава в упругих полях прямолинейных дислокаций с линиями  $\langle 112 \rangle$ . Подобная трактовка может оказаться полезной при интерпретации механизма образования центров зарождения и их развития во времени при росте как одного МК, так и целого ансамбля мартенситных кристаллов. Кристаллы, возникшие первыми, рождают спектр дислокационных центров зарождения [4] и создают такие макроскопические упругие поля напряжений. Комбинация этих факторов должна обуславливать отбор ориентировок и последовательность возникновения кристаллов в ансамблях, что наиболее четко может проявиться при росте ансамбля МК в области аустенита, ограниченной, например, двумя мартенситными кристаллами, возникшими на первом этапе. Отметим, что в соответствии с закономерностями, отмеченными в работе [5], в наблюдаемых ансамблях МК преобладают тупоугольные и остроугольные сочленения кристаллов (принадлежащих, как правило, одной и той же группе), обозначаемые типами  $A_i - B_i$ ,  $A_i - C_i$ ,  $A_i - D_i$ .

- [1] *Кащенко М.П.* Волновая модель роста мартенсита при  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращениях в сплавах на основе железа. Екатеринбург: Наука, 1993. 224 с.
- [2] *Кащенко М.П., Летучев В.В., Коновалов С.В. и др.* // ФММ. 1993. Т. 76. № 3. С. 90–101.
- [3] *Коновалов С.В., Яблонская Т.Н., Кащенко М.П.* // Материалы с эффектом памяти формы. СПб., 1995. С. 109–112.
- [4] *Кащенко М.П., Коновалов С.В., Яблонская Т.Н.* // Изв. вузов. Физика. 1994. Т. 37. № 6. С. 64–67.
- [5] *Okamoto H., Oka M., Tamura S.* // Trans. Jap. Instr. Met. 1978. Vol. 24. N 12. P. 674–684.

03;04

Журнал технической физики, т. 66, в. 11, 1996

## ВОЛНЫ ЗАРЯДА В ИОНИЗОВАННОМ ГАЗЕ ПЕРЕД ГИПЕРЗВУКОВЫМ ТЕЛОМ

© Ю.Л.Серов, М.П.Явор

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
(Поступило в Редакцию 27 сентября 1995 г.)

Несмотря на многолетние исследования физических процессов при движении гиперзвуковых тел и ударных волн, остается малоизученным целый ряд явлений, связанных с движением ударных волн с большими числами Маха, при которых может происходить полная деструкция волны [1]. Аналогичные явления происходят при сверхзвуковом движении тел и ударных волн в плазме. Наблюдаются значительные изменения обтекания [2], аномально высокая скорость распространения и сложная структура ударной волны [3]. Внимание к этим проблемам в последние годы связано с разработками в области создания гиперзвуковых самолетов, движущихся со скоростями, соответствующими числу Маха  $M > 10$ . Упомянутые выше эффекты не получили удовлетворительного объяснения вследствие ограниченности экспериментального материала, раскрывающего картину физических процессов при движении тел и ударных волн в плазме. В работе [4] было обнаружено, что перед гиперзвуковым телом существует протяженный электрический предвестник, состоящий из электронов, движущихся вместе с телом и значительно опережающих ударную волну. В настоящей работе более детально исследован указанный эффект и обнаружено, что в предвестнике происходят процессы, связанные с неустойчивостью волн в плазме перед головной ударной волной.

Эксперименты проводились на баллистической установке, описанной в работе [5]. Дюралюминиевая модель диаметром 20 мм выстреливалась со сверхзвуковой скоростью в барокамеру длиной  $\sim 7$  м с контролируемой атмосферой. Внутри заземленной металлической барокамеры диаметром 30 см (рис. 1) располагались кольцевые экранированные электростатические датчики диаметром 10 см. Экраны представляли собой заземленные металлические диски с наружным диаметром 12 см и отверстием диаметром 5 см, между которыми располагался датчик. Методика измерений подробно описана в работе [4].