

Редикульцев А.А., студент  
Русаков Г.М., доц., канд. техн. наук  
Лобанов М.Л., доц., канд. техн. наук

## ФОРМИРОВАНИЕ СПЕЦИАЛЬНОЙ РАЗОРИЕНТИРОВКИ $\Sigma 9$ В СПЛАВЕ Fe-3%Si ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ

### Введение

Высокие магнитные свойства технического сплава Fe-3%Si (электротехнической анизотропной стали – ЭАС) обеспечиваются созданием в нем на последних стадиях обработки «ребровой» текстуры (110)[001]. Основным процессом, ответственным за ее формирование, является вторичная рекристаллизация (ВР).

В последние годы интенсивно обсуждается вопрос о роли специальных границ зерен в проблеме вторичной рекристаллизации. Это обусловлено следующим обстоятельством. Основная текстурная компонента массива зерен, в котором развивается ВР, после холодной прокатки имеет «октаэдрическую» ориентировку {111}<112>. Результатом ВР является формирование острой «ребровой» текстуры {110}<001>. Сравнение точных «октаэдрической» и «ребровой» ориентировок кристаллов показывает, что они близки к специальной разориентировке  $\Sigma 9$  и отклоняются от нее на угол менее 4 градусов.

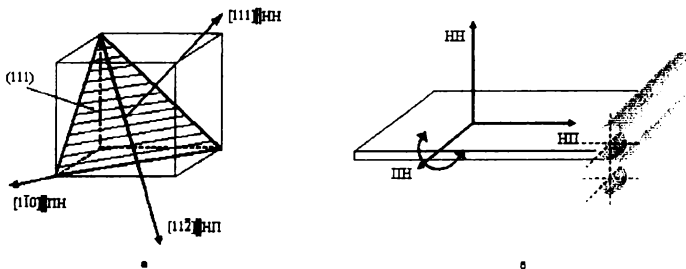
Естественно предположить, что зародыш ВР с «почти» ребровой ориентировкой будет, по крайней мере, с некоторых сторон огранен специальными границами типа  $\Sigma 9$ , которые могут обладать высокой подвижностью по сравнению с границами общего типа, ограничивающими другие зародыши, и, следовательно, получит преимущество в скорости роста. Применительно к техническому сплаву Fe-3%Si имеющиеся данные о специальных границах позволяют лишь предполагать возможность их появления в процессе отжига между зернами, образующими РСУ с  $\Sigma 9$ . Вопрос об их появлении и подвижности является очень сложным и требует отдельного рассмотрения. Мы же остановимся на рассмотрении вопроса о происхождении зерен с «ребровой» ориентировкой, находящихся в  $\Sigma 9$  специальной разориентации с окружающей их «октаэдрической» матрицей.

### Получение области «ребровой» ориентировки в кристалле «октаэдрической» ориентировки в процессе его вторичного двойникового

Деформация сплава Fe-3%Si наряду со скольжением может осуществляться двойникованием по системе {112}<111>. Если в процессе деформации наряду с первичными двойниками образуются вторичные двойники, то по отношению к исходному кристаллу они могут находиться в  $\Sigma 9$

разориентации. Проанализируем возможность формирования областей «ребровой» ориентировки в исходном кристалле «октаэдрической» ориентировки по механизму его вторичного двойникования.

Рассмотрим кристалл «октаэдрической» ориентации, при которой его плоскость  $(111)$  и направление  $[11\bar{2}]$  совпадают с плоскостью и направлением холодной прокатки соответственно. При этом направление кристалла  $[1\bar{1}0]$ , очевидно, лежит в плоскости прокатки перпендикулярно направлению прокатки, т.е. совпадает с осью валков (рис.1, а).



НН – направление нормали к плоскости прокатки; НП – направление прокатки;  
ПН – направление, перпендикулярное к направлению прокатки и лежащее в плоскости прокатки

Рис. 1. Исходная ориентация кристаллической решетки (а) и ее возможная трансформация при прокатке (б)

Кристаллические решетки исходного кристалла любой ориентировки и его двойника условимся считать связанными отражением в плоскости двойникования  $\{112\}$ . Тогда матрица перехода между кристаллографическими базисами этих решеток  $A_{(hkl)}$  имеет вид:

$$A_{(hkl)} = \frac{-1}{h^2 + k^2 + l^2} \begin{pmatrix} h^2 - k^2 - l^2 & 2hk & 2hl \\ 2hk & k^2 - l^2 - h^2 & 2kl \\ 2hl & 2kl & l^2 - h^2 - k^2 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Индексы плоскости отражения  $(hkl)$  связаны с обратной плотностью совпадающих узлов  $\Sigma$  РСУ матрицы и двойника соотношением:  $h^2 + k^2 + l^2 = \Sigma$ . Матрица может быть использована для определения индексов параллельных кристаллографических плоскостей и направлений в рассматриваемых решетках.

На основании соображений симметрии примем, что основные трансформации кристаллической решетки при деформации должны сводиться к повороту вокруг оси  $[1\bar{1}0]$ , которая совпадает с осью валков (рис. 1, б). Зоне  $[1\bar{1}0]$  исходной «октаэдрической» ориентировки кристалла принадлежат две плоскости двойникования  $(112)$  и  $(1\bar{1}\bar{2})$ , которые составляют с плоскостью

19,47° и 90° соответственно. Очевидно, что действие второй плоскости двойникования, перпендикулярной плоскости и направлению прокатки при холодной деформации, представляется маловероятным. Поэтому в качестве единственной плоскости двойникования остается (112). Матрица отражения в плоскости (112) имеет вид:

$$A_{(112)} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & \bar{1} & \bar{2} \\ \bar{1} & 2 & \bar{2} \\ \bar{2} & \bar{2} & \bar{1} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Рассмотрим возможность вторичного двойникования первичного двойника системы (112)[ $\bar{1}\bar{1}1$ ]. Кристаллографическое направление [ $\bar{1}\bar{0}$ ], сохраняющееся при первичном двойниковании, содержит плоскости (112) и (11 $\bar{2}$ ) первичного двойника. Очевидно, что отражение в первой плоскости приведет к восстановлению исходной «октаэдрической» ориентировки кристалла, т.е. описывает процесс антидвойникования, и по этой причине не представляет для нас интереса. Таким образом, вторичное двойникование, сохраняющее кристаллографическое направление [ $\bar{1}\bar{0}$ ], возможно только по системе (11 $\bar{2}$ )[111].

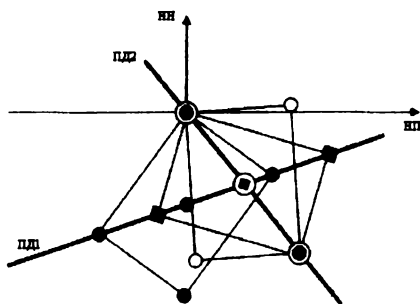
Матрица отражения в плоскости (11 $\bar{2}$ ) имеет вид:

$$A_{(11\bar{2})} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & \bar{1} & 2 \\ \bar{1} & 2 & 2 \\ 2 & 2 & \bar{1} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Решетка произвольного вторичного двойника либо совпадает с решеткой исходного «октаэдрического» кристалла, либо находится по отношению к ней в специальной разориентации  $\Sigma 9$ . Для определения ориентировки вторичного двойника в рассматриваемом нами случае сохранения кристаллографического направления [ $\bar{1}\bar{0}$ ] перемножим матрицы (2) и (3), описывающие последовательные преобразования решетки при первичном и вторичном двойниковании:

$$A_{(11\bar{2})} A_{(112)} = \frac{1}{9} \begin{pmatrix} 1 & \bar{8} & \bar{4} \\ \bar{8} & 1 & \bar{4} \\ 4 & 4 & \bar{7} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Матрица (4) связывает кристаллографические базисы двух кристаллов, находящихся в ориентационном соотношении (111)[11 $\bar{2}$ ] ( $\bar{1}\bar{1}\bar{1}1$ )[1 1 22], т.е. описывает процесс преобразования «октаэдрической» ориентировки, через процессы первичного и вторичного двойникования в «почти ребровую» ориентировку (рис. 2). Отклонение от точного соотношения при повороте вокруг оси [ $\bar{1}\bar{0}$ ] составляет угол всего 3,68°.



- - узлы исходной решетки; ■ - узлы решетки первичного двойника;
- - узлы решетки вторичного двойника; ⊙ - узлы решетки совпадений  $\Sigma 9$ ;
- ПД1 – плоскость первичного двойникования (112);
- ПД2 – плоскость вторичного двойникования ( $1\bar{1}2$ )

Рис. 2. Преобразование «октаэдрической» ориентировки в «ребровую» в результате вторичного двойникования. Плоскость рисунка - ( $1\bar{1}0$ )

### Заключение

В техническом сплаве Fe-3%Si области «ребровой» ориентировки могут быть образованы в результате вторичного двойникования в зернах «октаэдрической» ориентации, широко представленной в текстуре деформации.

Вторичные двойники ориентировки (110)[001] находятся с окружающей «октаэдрической» матрицей в  $\Sigma 9$ -разориентации. Данный факт является важным для моделей протекания ВР, основывающихся на высокой подвижности специальных границ, так как показывает, что специальная разориентация  $\Sigma 9$  может формироваться уже при холодной деформации.

Новый взгляд на формирование «ребровой» ориентировки не дает ответ на самый главный вопрос – об ее эволюции при ВР. Однако высказанная нами гипотеза может облегчить пути решения этой сложной задачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 04-02-96086 (Урал)) и Фонда ОАО «ММК», ИТЦ «Аусферр» и ФНиО «Интелс» (грант № 13-03-01).