

К. ф.-м.н. В. В. УСОВ

Украина, г. Одесса, Южноукраинский гос. педагогический ун-т им. К. Д. Ушинского  
E-mail: usov@balkan.farlep.netДата поступления в редакцию  
06.02 2001 г.

Оппонент д. т. н. Р. И. МАЛИНИНА

## ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА АНИЗОТРОПИЮ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СТАЛИ

*Учет анизотропии позволит уменьшить тепловые потери, обусловленные вихревыми токами, например, в магнитопроводах электродвигателей или трансформаторов.*

В электронной аппаратуре широко используются магнитомягкие металлические материалы, в частности, трансформаторная сталь. Пластическая обработка, которая лежит в основе технологии металлических материалов электронной техники, приводит к образованию дефектов кристаллического строения материала, которые, как правило, распределяются неоднородно, образуя ячеистые структуры [1]. Это обстоятельство, как было показано в [2], приводит к возникновению анизотропии электропроводности в металлах и сплавах с гранцентрированной кубической (ГЦК) решеткой после значительных пластических деформаций (более 60 % обжатия). В то же время, согласно классическим представлениям, вошедшим в учебники и монографии по кристаллофизике, электропроводность в металлах с кубической решеткой является изотропной.

Цель данной работы — исследование влияния пластической деформации на электропроводность трансформаторной стали, имеющей объемно центрированную кубическую (ОЦК) решетку.

Материалом для исследования послужил сплав на основе Fe — 3% Si (вес.) — трансформаторная сталь, которая в исходном рекристаллизованном состоянии представляла собой полосы толщиной 2,4 мм со средним размером зерна 22 мкм. Пластическую деформацию осуществляли прокаткой при комнатной температуре до различных степеней деформации в интервале от 0 до 80% обжатия. Это соответствовало истинным относительным логарифмическим степеням деформации  $\epsilon_n = \lg [(l - l_0)/l_0]$  в интервале от 0 до 1,61, где  $l$  и  $l_0$  соответственно конечная и начальная длина листа.

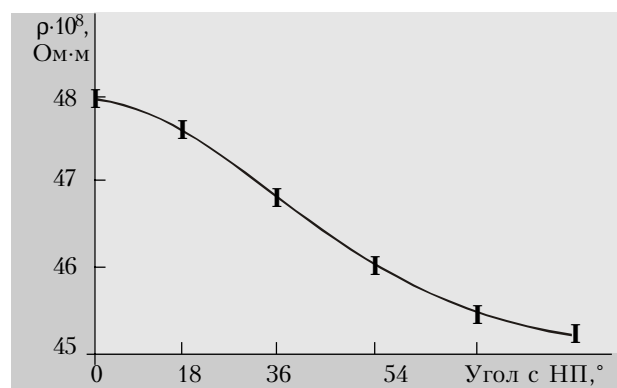
Для исследования анизотропии электропроводности из деформированных листов исследуемого материала вырезали прямоугольные образцы в плоскости прокатки под различными углами от направления прокатки (НП) до поперечного направления (ПН) размерами 100×10 мм. Чтобы уменьшить погрешности измерения, образцы обрабатывали в пакете. Электросопротивление  $\rho$  измеряли четырехзондовым методом по схеме двойного

моста; погрешности измерений не превышали 0,5%. Кристаллографическую текстуру изучали рентгеновским методом.

Текстура трансформаторной стали, обнаруженная нами, является типичной текстурой прокатки ОЦК-металлов и, в основном, состоит из двух компонентов. Один из них (главный, 70% по объему) составляют кристаллиты, плоскости {001} которых совпадают с плоскостью прокатки. Одновременно направления <110> таких кристаллитов совпадают с направлением прокатки. Второй компонент текстуры (30% по объему) составляют кристаллиты, плоскости {111} которых совпадают с плоскостью прокатки листов. При этом кристаллографические направления <110> совпадают с НП листов. Полученные результаты по текстуре находятся в соответствии с данными других авторов [3, с. 185].

Измерения электросопротивления  $\rho$  в зависимости от направления в плоскости прокатки показали, что эта характеристика изотропна в исходных рекристаллизованных листах. Анизотропия электрического сопротивления  $\rho$  возникает после холодной прокатки со степенью  $\epsilon_n = 1,61$ . Соответствующие экспериментальные данные представлены на **рисунке**, откуда видно, что электрическое сопротивление  $\rho$  в НП больше, чем в ПН (соответственно электропроводность  $\sigma$ , наоборот, в ПН больше, чем в НП).

Известно, что рассеяние электронов проводимости в металлах (в первую очередь, за счет вызываемых упругих деформаций решетки) на дислокациях



Анизотропия электросопротивления листа трансформаторной стали после холодной прокатки с истинной логарифмической степенью деформации 1,61

должно носить тензорный характер. В этом случае будут отличны от нуля три компонента тензора: вдоль оси дислокации, вдоль нормали к дефекту упаковки и в направлении вектора Бюргерса.

Ранее нами было показано [4], что дислокационная структура вышеуказанных основных текстурных компонентов упомянутого сплава отличается. Дислокационные ячейки главного текстурного компонента {001}<110> вытянуты преимущественно в НП и ПН, а их субграницы совпадают с внешними осями образца НП, ПН и НН (направление нормали к плоскости листа). Дислокационные ячейки дополнительного компонента текстуры {111}<110> заметно меньше по размерам, так же, как и их неравноосность. Субграницы дислокационных ячеек компонента {111}<110> не имеют преимущественной направленности по отношению к системе координат листа.

С учетом отличий в дислокационной структуре главных текстурных компонентов деформированный текстурованный поликристалл Fe – 3% Si можно рассматривать (в качестве модели) в виде микронеоднородного материала (МНМ). В работе [5, с. 51] показано, что определение эффективных свойств МНМ может быть успешно осуществлено, если использовать понятие фрактала – геометрического объекта, имеющего дробную размерность. При этом эффективная электропроводность может быть найдена с привлечением перколяционной модели [6, с. 28].

Выделим представительный объем МНМ. Этот объем представляет собой матрицу с включениями. Главные оси тензоров электрического сопротивления матрицы (меза-область текстурного компонента {001}<110>) и включения (меза-область текстурного компонента {111}<110>) направим вдоль субграниц ячеистой дислокационной структуры соответствующих текстурных компонентов.

Поскольку, как упоминалось выше, ориентации субграниц дислокационных ячеек в меза-области текстурного компонента {111}<110> (включения) не имеют преимущественной направленности, то в качестве первого приближения примем, что в плоскости прокатки включения вносят изотропный вклад в электрическое сопротивление. Главные оси тензора  $\rho$ , вносимого дислокациями в компоненте текстуры {001}<110> (матрицы), направим в соответствии с вышеописанной дислокационной ячеистой структурой вдоль НП, ПН, НН листа, т. е. оси кристаллографической и лабораторной системы координат будут совпадать, в отличие от ГЦК-металлов [2]. Тогда значения  $\rho$  в НП и ПН, полученные экспериментально для сплава Fe – 3% Si (см. рис.), представляют собой значения компонентов тензора эффективного электросопротивления анизотропной микронеоднородной среды.

Согласно закону преобразования тензора второго ранга, зависимость  $\rho$  от направления в плоскости листа имеет вид [7, с. 79]

где  $\varphi$  – угол с НП;  
 $\rho_{11}^{\text{эф}}$  и  $\rho_{22}^{\text{эф}}$  – компоненты тензора эффективного электрического сопротивления по осям ОХ и ОУ.

$$\rho(\varphi) = \rho_{11}^{\text{эф}} \cos^2 \varphi + \rho_{22}^{\text{эф}} \sin^2 \varphi, \quad (1)$$

Так как при измерении  $\rho$  всегда присутствуют ошибки измерений, то для более точного определения  $\rho_{11}^{\text{эф}}$  и  $\rho_{22}^{\text{эф}}$  из экспериментальных данных минимизировали соотношение (1) по методу наименьших квадратов. В результате было получено, что  $\rho_{11}^{\text{эф}} = 47,78 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, а  $\rho_{22}^{\text{эф}} = 45,35 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

Для того чтобы вычислить вклад дислокаций каждого текстурного компонента в наблюдаемую анизотропию  $\rho$ , в соответствии с выбранной моделью представим компоненты тензора эффективного электросопротивления в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \rho_{11}^{\text{эф}} &= C_1 \rho_{11}^{\text{м}} + C_2 \rho^{\text{в}} \\ \rho_{22}^{\text{эф}} &= C_1 \rho_{22}^{\text{м}} + C_2 \rho^{\text{в}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – объемное содержание текстурных компонент {001}<110> (матрицы) и {111}<110> (включения), соответственно;  $C_1 = 0,7$ ,  $C_2 = 0,3$ ;

$\rho_{11}^{\text{м}}$  и  $\rho_{22}^{\text{м}}$  – анизотропный вклад дислокаций матрицы;

$\rho^{\text{в}}$  – изотропный вклад включения.

Как упоминалось выше, дислокации рассеивают электроны проводимости в металлах, в первую очередь, за счет вызываемых этими дислокациями упругих деформаций решетки, т. е. микроискажений. Оценки последних, проведенные нами, показали, что микроискажения решетки кристаллов матрицы в 1,35 раза больше, чем для решетки кристаллов включения. Учет этого условия позволяет дополнить систему уравнений (2), которая теперь будет разрешима.

В результате решения (2) были получены следующие дислокационные вклады в наблюдаемую анизотропию  $\rho$  деформированного с  $\epsilon_{\text{н}} = 1,91$  сплава Fe – 3% Si:  $\rho_{11}^{\text{м}} = 44,46 \cdot 10^{-8}$  Ом·м;  $\rho_{22}^{\text{м}} = 40,99 \cdot 10^{-8}$  Ом·м;  $\rho^{\text{в}} = 55,54 \cdot 10^{-8}$  Ом·м. На рисунке, наряду с экспериментальными значениями с учетом погрешностей измерений, представлена расчетная кривая анизотропии  $\rho$ , полученная по соотношениям (1) и (2).

Обнаруженная нами анизотропия  $\rho$  может быть связана, в принципе, с ферромагнетизмом сплава. При температурах ниже точки Кюри электрическое сопротивление  $\rho$  ферромагнетика фактически включает также и магнетосопротивление (даже в отсутствие внешнего магнитного поля).

Магнетосопротивление обусловлено самопроизвольной намагниченностью во внутреннем магнитном поле каждого домена. Это добавочное электрическое сопротивление ферромагнитного металла вызвано взаимодействием электронов проводимости с магнитным полем спиновых волн. Другими словами, это электрическое сопротивление обусловлено спин-орбитальной связью  $s$ - и  $d$ -электронов и является анизотропным [8, с. 853]. Однако отсутствие анизотропии  $\rho$  в исходном рекристаллизованном состоянии сплава Fe – 3% Si позволяет заключить, что вклад анизотропии магнетосопротивления в отсутствие внешнего магнитного поля не превышает погрешности измерения (~0,5%).

Учет анизотропии электрического сопротивления трансформаторной стали, например, при изготовле-

нии магнитопроводов трансформаторов или электродвигателей (в особенности маломощных), позволит уменьшить тепловые потери в сердечниках за счет вихревых токов. С этой целью можно рекомендовать вырезать пластины, из которых набираются сердечники, в направлении, совпадающем с направлением прокатки листов, где электросопротивление максимально. Поскольку мощность тепловых потерь  $P_{\text{п}}$  при напряжении на первичной обмотке  $U$  обратно пропорциональна электросопротивлению  $R$  пластины наборного сердечника ( $P_{\text{п}} = U^2/R$ ), то в рассмотренном случае (см. рис.) тепловые потери в случае изготовления сердечника из пластин, вырезанных в направлении прокатки, уменьшатся на ~7% в сравнении с сердечником, набранным из пластин, вырезанных в поперечном направлении листа.

Указанный эффект уменьшения тепловых потерь в магнитопроводах, набранных из пластин, вырезанных в направлении, совпадающем с направлением прокатки листа, будет еще больше, если учесть, что пластическая обработка трансформаторной стали с более высокими значениями обжатия увеличивает анизотропию электрического сопротивления.

\*\*\*

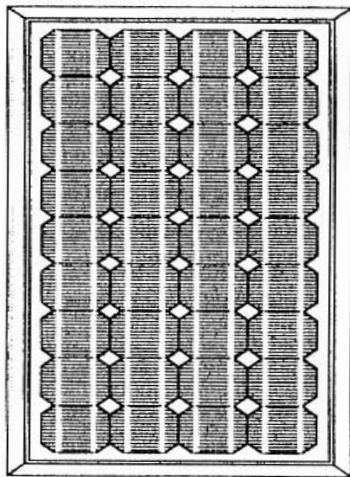
Таким образом, при истинных относительных логарифмических степенях деформации 1,61 и выше электропроводность трансформаторной стали Fe-3% Si с ОЦК-решеткой является анизотропной. При этом электрическое сопротивление в направлении прокатки листа на ~7% больше, чем в поперечном направлении. Основной причиной возникновения ани-

зотропии электропроводности является неоднородное распределение дислокаций после пластической обработки.

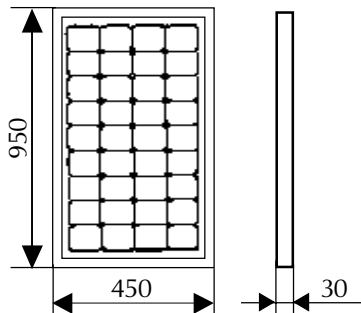
Изготовление, например, магнитопроводов электродвигателей и трансформаторов из пластин трансформаторной стали с учетом полученных результатов позволит уменьшить возникающие тепловые потери.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Hansen N. Cold deformation microstructures // Mater. Sci. and Technol. – 1990. – Vol. 6, N 11. – P. 1039 – 1047.
2. Днепренко В. Н., Усов В. В. Анизотропия электропроводности деформированных металлов, обусловленная дефектной структурой // Металлофизика. – 1992. – Т. 14, № 9. – С. 19 – 27.
3. Бородкина М. М., Спектор Э. Н. Рентгенографический анализ текстур в металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1982.
4. Bryukhanov A. A., Usov V. V., Bryukhanova Z. A. Influence of the plastic processing on forming of the dislocation structures in BCC-alloys of iron // Metallurgy. – 2000. – Vol. 39, N 3. – P. 1024.
5. Привалко В. П., Новиков В. В., Яновский Ю. Г. Основы теплофизики и реофизики полимерных материалов. – Киев: Наук. думка, 1991.
6. Дульнев Г. Н., Новиков В. В. Процессы переноса в неоднородных средах. – Л.: Энергоатомиздат, 1991.
7. Най Дж. Физические свойства кристаллов. – М.: ИЛ, 1960.
8. Вонсовский С. В. Магнетизм. – М.: Наука, 1971.



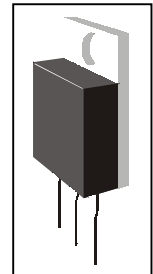
Гарантийное (3 года) и постгарантийное обслуживание



**ОКБ "РУТА"  
ОАО "Травитон"**

Украина, г. Черновцы

**БАТАРЕЯ СОЛНЕЧНАЯ ВС-50**



Предназначена для автономного электропитания жилых домов и бытовой электроаппаратуры.

Благодаря накоплению электроэнергии посредством зарядки аккумуляторных батарей осуществляет электропитание потребителей как в светлое, так и в темное время суток.

Увеличение мощности достигается путем параллельного подключения дополнительных ячеек.

**Технические характеристики**

Габаритные размеры, мм	950×450×30
Максимальная мощность, Вт	47
Рабочее напряжение, В	6,5
Рабочий ток, А	2,8–3,0
Напряжение холостого хода, В	21
Диапазон рабочих температур, °С	–40...+50
Масса, кг	5,5

☎ (03722) 6-18-65, 6-19-81