

КОНТРОЛЬ НЕОДНОРОДНОСТИ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЛИСТОВОЙ АНИЗОТРОПНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

© 2019 г. В.Ф. Тиунов^{1,*}, Г.С. Корзунин¹

¹Институт физики металлов УрО РАН, 620119 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18.
E-mail: * tiunov@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 14.11.2018; после доработки 28.12.2018;
принята к публикации 19.01.2019

Предложен и опробован сравнительно простой метод определения магнитной проницаемости в отдельных участках листовой электротехнической стали Fe—3%Si с помощью милливеберметра. Установлено, что полосовая анизотропная электротехническая сталь АЭС с весьма острой кристаллографической текстурой неоднородна по величине магнитной проницаемости в разных участках полосы. Данный метод измерения может быть применен для оптимизации дополнительной обработки стали путем дробления ее доменной структуры ДС с целью максимального снижения уровня ее магнитных потерь.

Ключевые слова: магнитная проницаемость, электротехническая сталь, электромагнит, кристаллографическая текстура, магнитные потери.

DOI:10.1134/S0130308219030084

Известно, что анизотропная электротехническая сталь (Fe—3%Si) АЭС имеет отличные магнитные свойства: невысокий уровень магнитных потерь на перемагничивание, высокую магнитную проницаемость, низкую коэрцитивную силу и неплохие механические характеристики [1]. Все эти показатели обусловили широкое применение АЭС в качестве магнитопроводов электрических машин различного назначения — всевозможных электродвигателей и трансформаторов. Учитывая колоссальные объемы выпускаемой АЭС, проблема улучшения ее магнитных свойств и в первую очередь снижения уровня магнитных потерь имеет большое практическое значение. В анизотропной стали Fe—3%Si с острой кристаллографической текстурой подавляющую часть полных магнитных потерь составляет их вихревая составляющая. На долю последних приходится 75—80 % величины полных магнитных потерь [1]. И проблема их снижения связана, в первую очередь, со снижением потерь на вихревые токи, которые, наряду с другими факторами, существенно зависят от размеров доменной структуры ДС: с их уменьшением величина потерь падает. В настоящее время известны некоторые эффективные пути уменьшения величины последних. Так, один из них связан с искусственным дроблением ДС АЭС путем обработки ее поверхности технологическим лазером [2]. Другой способ осуществляется нанесением на нее локально деформированных зон механическим царапанием поверхности листа АЭС в направлении, перпендикулярном оси прокатки [3]. Известно, что наименьшие магнитные потери в АЭС достигаются при оптимальной ориентации кристаллитов, когда их кристаллографическая плоскость {110} отклонена от поверхности листа на некоторый угол $\beta \approx 3-4^\circ$. При этом направление прокатки совпадает или разориентировано относительно оси $\langle 001 \rangle$ на небольшой угол $\alpha < 2-3^\circ$ [4]. Однако из-за нестабильности технологии производства сталей (неоднородности температуры отжига, неоднородности толщины электроизоляционного покрытия, различной степени обжата при прокатке и др.) различные участки листа АЭС имеют нередко неоднородные магнитные свойства. В частности, значения магнитных потерь, магнитной проницаемости заметно отличаются по величине в различных областях листовой стали. Впервые эта неоднородность магнитных свойств АЭС была детально исследована в [5]. Автор указал на возможные причины проявления указанной неоднородности. Позже [6] наличие значительной внутрилистной неоднородности магнитных свойств было выявлено в АЭС даже с очень острой ребровой текстурой. Так, в разных участках полосы АЭС с $B_{2500} = 1,98$ Тл величина магнитной проницаемости отличалась почти на 40 %.

Таким образом, видно, что при наличии неоднородных магнитных свойств по длине полосы АЭС для наибольшей эффективности дополнительной обработки ее поверхности необходимо знать степень текстурованности обрабатываемых участков. Для этого в [6] предлагалось вести ее контроль с помощью текстурометров. Однако данный способ требует использования специализированных приборов и позволяет судить о величине текстуры образца на сравнительно крупном участке образца. Кроме того, применение подобной аппаратуры затрудняет автоматизацию процесса нанесения локально деформированных зон на участки поверхности образца в зависимости от их магнитных свойств.

Исходя из сказанного, целью настоящей работы являлась разработка несложной методики измерений, не требующей специализированных приборов, позволяющей сравнительно быстро оценить уровень магнитной проницаемости и степень текстурованности в небольших участках полюсовой АЭС соответственно.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Исследовали эшштейновские полосы из АЭС марки Ст.3412 ($B_{2500}=1,80$ Тл) размерами $500 \times 30 \times 0,35$ мм. В разных участках образцов определяли величину индукции $B_{\max}$. Блок-схема установки приведена на рис.1а. Исследуемую полосу 1 устанавливали на полюса электромагнита U-образной формы 2. Намагничивающие катушки электромагнита 3 подключали к регулируемому источнику постоянного тока 5. Величину индукции $B_{\max}$ определяли с помощью узкой (3 мм) измерительной катушки 6, надеваемой на образец и подсоединенной к милливеберметру 7. При коммута-

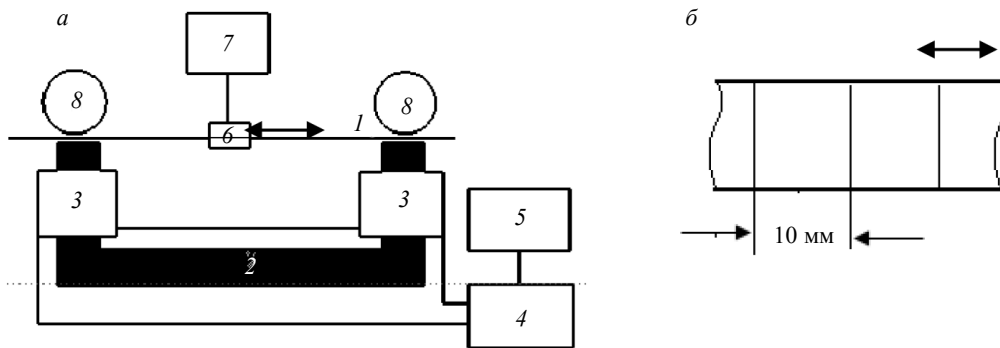


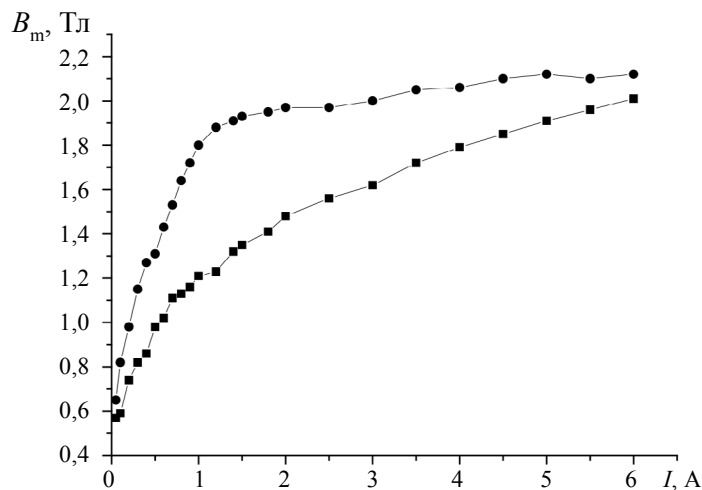
Рис.1. Схема установки для определения величины магнитной проницаемости (а):

1 — эшштейновская полоса АЭС; 2 — магнитопровод э/магнита; 3 — намагничивающие катушки; 4 — коммутатор (переключатель); 5 — источник постоянного тока; 6 — измерительная катушка; 7 — милливеберметр М119; 8 — прижимные ролики; Разметка полосы и направление ее движения при измерениях (б).

ции намагничивающего тока от $+I$ до $-I$ с помощью переключателя 4, измеряли значение индукции $B_{\max} = C\alpha/\omega S$. Здесь α — показания прибора, ω — число витков измерительной катушки, S — ее поперечное сечение. То есть $B_{\max}$ пропорциональна величине отклонения показаний милливеберметра $B \sim k\alpha$. Для определения значения индукции в локальных участках образца использовали многослойную (15 слоев обмоточного провода) измерительную катушку небольшой ширины (3 мм). При такой конфигурации определить точно ее поперечное сечение и, соответственно, рассчитать непосредственно величину индукции не удалось. Калибровку измерительной катушки проводили следующим образом: в произвольной области эшштейновской полосы измеряли кривую намагничивания $\alpha = f(I)$ вплоть до технического насыщения материала. Из нее определяли коэффициент пропорциональности $k = B_s/\alpha_s$, где α_s — показания милливеберметра, соответствующие индукции насыщения материала $B_s \approx 2,13$ Тл. С учетом этого коэффициента по измеренным значениям α рассчитывали величину индукции $B_{\max}$ в разных участках эшштейновской полосы. Перед измерениями на ее поверхность образца по всей ее длине через каждые 10 мм наносились контрольные метки (рис.1б). Величина индукции в отмеченных участках определяли путем перемещения образца в межполюсном промежутке и внутри катушки (указано стрелками), которая оставалась неподвижной и располагалась посередине расстояния между полюсами электромагнита. Подобный способ измерений позволял свести до минимума влияние полей рассеяния полюсов электромагнита на измерительную катушку. После того, как измерения были проведены по всем отмеченным участкам, образец поворачивался на 180° и измерения индукции в указанных областях образца проводили при его смещении в межполюсном промежутке, но уже в противоположную сторону. Затем полученные результаты усреднялись. Относительная погрешность измерения величины индукции различных участков эшштейновской полосы не превышала 5 %.

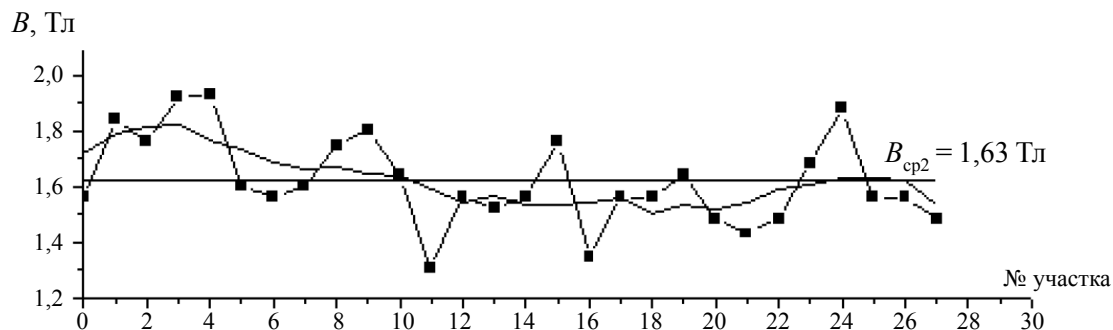
РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим полученные результаты. На рис. 2 в качестве примера приведены две кривые намагничивания, снятые в разных участках одной из эшштейновских полос. Видно, что во всем ин-

Рис.2. Кривые намагничивания $B = f(I)$ участков № 3, № 11 образца.

тервале изменения намагничивающего тока (соответственно и магнитного поля) величина $B_{\max}$ участка № 3 намного выше ее значения, измеренного на участке № 11. Например, при $I = 1,0$ А это превышение составляет почти 60 %. Иными словами, в соответствии с термином, впервые введенным Янусом [5], в рассмотренной эпштейновской полосе наблюдается сильная внутрилистная неоднородность магнитных свойств. Наиболее полно последить за ее особенностями на рассмотренном образце можно на рис. 3. Здесь приведено изменение индукции по длине образца при намагничивающем токе электромагнита $I = 1,0$ А. Сглаженные кривые построены по усредненным значениям $B_{\max} = f(n)$, n — номер исследованного участка. Прямая линия соответствует значению индукции $B_{\text{ср}}$, усредненному по всем исследованным участкам образца. Из рисунка видно, что значение индукции различных участков образца, а, соответственно, и их магнитная проницаемость также существенно отличается друг от друга. Как уже отмечалось выше (см. рис. 2) расхождение между максимальной индукцией (участок № 3) и минимальным ее значением (участок № 11) достигает почти 60 %. Иными словами, в образце наблюдается заметная внутрилистная неоднородность распределения магнитной индукции (при $I = \text{const}$) по его длине.

Обсудим полученные результаты. Расхождение между кривыми намагничивания на рис. 2 можно связывать в первую очередь разной степенью текстурованности исследованных участков эпштейновской полосы. В областях образца с наибольшей магнитной проницаемостью ось легкого намагничивания типа $\langle 001 \rangle$ большинства кристаллитов ориентирована наиболее близко к направлению прокатки. Перемагничивание таких кристаллитов идет, главным образом, путем смещения 180° доменных границ относительно крупной полосовой доменной структуры. Напротив, в участках образца с меньшей магнитной проницаемостью можно ожидать, что у значительной части кристаллитов ось $\langle 001 \rangle$ разориентирована относительно друг друга или относительно направления прокатки на некоторый угол $\alpha > 0$. Именно такой случай наблюдался ранее в [7]. В ней на дисках, вырезанных из одной эпштейновской полосы АЭС марки 3407, наблюдалось существенное расхождение, как магнитной проницаемости, так и магнитных потерь, при пере-

Рис.3. Изменение индукции B по длине полосы. Намагничивающий ток $I = 1,0$ А.

магничивании образцов во вращающихся магнитных полях. Непосредственные наблюдения показали, что вид ДС в размагниченном состоянии образцов заметно отличался. Так, в кристаллитах образца с максимальными величиной магнитной проницаемости и потерь выявлялась сравнительно крупная полосовая ДС. Ее 180° доменные границы в отдельных кристаллитах были разориентированы относительно друг друга на небольшой угол $\alpha \approx 2-3^\circ$.

В отличие от этого, в образце с наименьшей проницаемостью рассмотренная разориентация границ в ряде зерен достигала $7-9^\circ$ и на межзеренной границе возникала мелкая замыкающая ДС. Кроме того, кристаллографическая плоскость $\{110\}$ некоторых зерен была отклонена от поверхности образца на угол $\beta \approx 2-3^\circ$, что проявлялось в появлении внутри полосовых доменов мелкой замыкающей ДС в виде каплевидных доменов. Последние, как известно [4], в процессе перемагничивания прорастают в новые полосовые домены и, тем самым, способствует дроблению исходной 180° ДС. Подобное поведение ДС на этом образце и приводит к его меньшим магнитным потерям, чем на первом образце.

Таким образом, из рассмотренного видно, что искусственное дробление ДС целесообразно применять лишь в участках образца с наибольшей магнитной проницаемостью, имеющих относительно крупную полосовую ДС. Напротив, дробление ДС кристаллитов с небольшой шириной доменов нецелесообразно, так как в этом случае рассматриваемая обработка может привести даже к росту полных потерь вследствие роста их гистерезисной составляющей.

ВЫВОДЫ

1. Испытан простой метод измерения магнитной проницаемости в отдельных участках листов электротехнической стали с использованием милливеберметра М119.
2. Установлено, что анизотропная электротехническая сталь даже с весьма острой кристаллографической текстурой неоднородна по магнитным свойствам в разных участках полосы.
3. Предложенный метод может быть применен для оптимизации дополнительной обработки стали путем дробления ее ДС с целью максимального снижения уровня магнитных потерь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали. М.: Энергия, 1974. 239 с.
2. Соколов Б.К., Губернаторов В.В., Носков М.М., Золотарев А.И. Способ обработки электротехнической стали. А.С. № 652230 // Бюлл. изобр. 1979. № 10.
3. Тиунов В.Ф., Соколов Б.К., Губернаторов В.В. Влияние деформированных зон на динамическое поведение доменной структуры и магнитных потерь в кристаллах Fe—3 мас.%Si // ФММ. 1991. №11. С. 79—84.
4. Зайкова В.А., Старцева И.Е., Филиппов Б.Н. Доменная структура и магнитные свойства электротехнических сталей. М.: Наука, 1992. 272 с.
5. Янус Р.И. О полистной неоднородности магнитных свойств электротехнического железа // ФММ. 1955. Т.1. С. 84—91.
6. Корзунин Г.С. Магнитные методы определения кристаллографической текстуры. Екатеринбург: УрО РАН, 1995. 127 с.
7. Тиунов В.Ф. О влиянии неоднородности перемагничивания анизотропной электротехнической стали Fe—3%Si на магнитные потери во вращающихся магнитных полях // ФММ. 2018. Т.119. № 9. С. 876—881.