

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕРОВ ЗЕРНА В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ

Плотников С.М.

Ключевые слова: электротехническая сталь, магнитные потери, гистерезис, вихревые токи, размер зерна.

Аннотация. Исходя из зависимостей потерь на гистерезис и на вихревые токи от размеров зерна анизотропной электротехнической стали, получено выражение оптимального сечения зерна, при котором полные потери в магнитопроводе минимальны. Рассмотрены способы варьирования размеров зерна в процессе производства. Методика расчета усредненного размера зерна представлена на примере стали М140-30S.

OPTIMIZATION OF GRAIN SIZES IN ELECTRICAL STEEL BY CRITERION OF MINIMUM MAGNETIC LOSSES

Plotnikov S.M.

Keywords: electrical steel, magnetic losses, hysteresis, eddy currents, grain size.

Abstract. Based on the dependences of losses for hysteresis and eddy currents on the grain size of anisotropic electrical steel, the expression for the optimal grain section is obtained, at which the total losses in the magnetic core are minimal. Methods of varying grain sizes during production are considered. The method for calculating the average grain size is presented on the example of M140-30S steel.

Анизотропная электротехническая сталь (АЭС) применяется для изготовления магнитопроводов силовых, распределительных и измерительных трансформаторов. В Российской Федерации АЭС выпускается толщиной от 0,15 мм до 0,5 мм. Качество стали характеризуется высокой максимальной индукцией, малой коэрцитивной силой, параметрами электроизоляционного покрытия и малыми магнитными потерями. Полные потери в стали (потери холостого хода) состоят их двух компонентов: потери на гистерезис P_{Γ} и потери на вихревые токи $P_{\text{в}}$, причем по некоторым параметрам данные составляющие являются разнонаправленными, что позволяет минимизировать потери по этим параметрам. Например, с уменьшением толщины листа магнитопровода $P_{\text{в}}$ снижаются, а P_{Γ} растут, на основании чего в [1] получено выражение оптимальной толщины листа.

Так же разнонаправлены составляющие потерь относительно размеров ферритового зерна. В процессе кристаллизации металла кристаллы приобретают неправильную форму. Их называют зернами. Каждое зерно имеет свою ориентировку кристаллической решетки, отличающуюся от ориентировки соседних зерен. Размер зерна металла влияет на его вязкость и пластичность, а также на магнитные потери. С увеличением размера (сечения) зерна коэрцитивная сила уменьшается, следовательно, уменьшаются гистерезисные потери P_{Γ} , а потери на вихревые тока $P_{\text{в}}$ увеличиваются. Считается, что рациональная величина зерна должна составлять 100–200 мкм, однако это значение должно быть уточнено для конкретной марки АЭС.

На рисунке 1 представлены зависимости удельных потерь при частоте 50 Гц и индукции 1,5 Тл от размеров зерна для АЭС М140-30S толщиной 0,3мм [2].

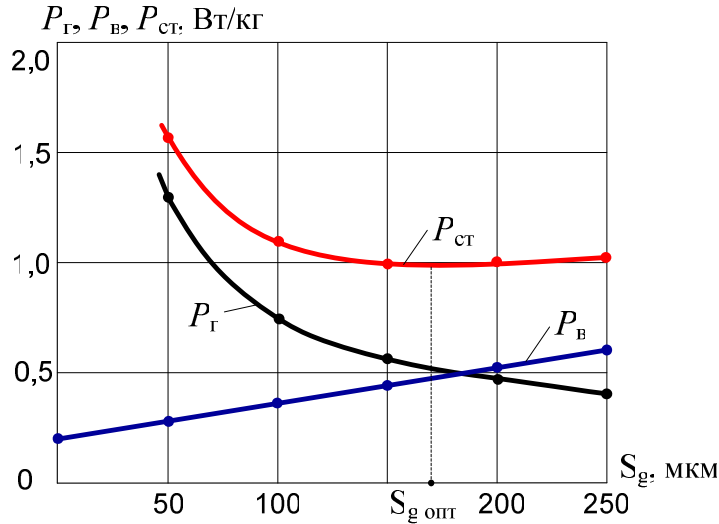


Рис. 1. Зависимости удельных потерь от сечения зерна стали М140-30S

Изменение потерь на гистерезис достаточно точно можно описать логарифмической зависимостью

$$P_g = a - b \cdot \ln S_g, \quad (1)$$

где a , b – соответственно начальное значение удельных потерь P_g и коэффициент жесткости логарифмической кривой; S_g – сечение зерна.

Изменение потерь на вихревые токи соответствует линейному уравнению

$$P_v = c + d \cdot S_g, \quad (2)$$

где c , d – соответственно начальное значение удельных потерь P_v и коэффициент наклона линии.

Уравнение полных потерь в стали

$$P_{ст} = P_g + P_v = a - b \cdot \ln S_g + c + d S_g.$$

Производная полных потерь по размеру зерна

$$(P_{ст})' = -\frac{b}{S_g} + d.$$

Приравняв производную нулю, получим оптимальное значение размера зерна, при котором потери в стали минимальны

$$S_{g, опт} = \frac{b}{d}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что оптимальное сечение зерна не зависит от начальных значений потерь, а определяется только коэффициентами наклона зависимостей $P_g(S_g)$ и $P_v(S_g)$. Расчет оптимального значения зерна рассмотрим на примере анизотропной стали М140-30S [Европейский стандарт EN 10107] толщиной 0,30 мм.

С погрешностью $\pm 5\%$ уравнение (1) можно записать в виде

$$P_r = 2,4 - 0,35 \ln S_g,$$

а выражение (1) имеет вид

$$P_b = 0,15 + 0,0018 S_g.$$

Тогда оптимальный размер зерна $S_{g, \text{опт}} = \frac{0,35}{0,0018} = 194$ мкм. Для данного

примера размер зерна должен составлять от 184 до 204 мкм.

Изменение размера зерна осуществляют варьированием химическим составом стали и параметрами ее обработки на различных технологических стадиях (горячая прокатка, отжиг, холодная прокатка, высокотемпературная обработка). Так, при содержании углерода в слябах перед горячей прокаткой менее 0,02% наблюдается разрастание (укрупнение) зерна, а наличие свыше 0,001% серы в готовой АЭС заметно увеличивает потери на гистерезис (перемагничивание). Варьирование степени деформации от 25 до 50 % и температуры начала прокатки от 900 до 1000⁰С дает возможность изменять размер зерна в широких пределах от 60 до 250 мкм [3]. В последнее время на некоторых предприятиях начала применяться локальная лазерная обработка стали с последующим отжигом, позволяющая регулировать размеры и форму зерен в АЭС и снизить магнитные потери на 6-12% [4].

Для определения оптимального размера зерна для конкретной марки АЭС необходимо использовать экспериментально снятые зависимости $P_r(S_g)$ и $P_b(S_g)$, рассчитать коэффициенты наклона b и d этих зависимостей и воспользоваться формулой (3). Представленная методика позволяет произвести качественный инженерный расчет (погрешность $\pm 5\%$) усредненного размера зерна АЭС с целью минимизации магнитных потерь.

Список литературы

1. Плотников С.М., Колмаков В.О. Минимизация потерь в магнитопроводе за счет оптимальной толщины пластин // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2020. – №19. – С. 39-42. – <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2020-19-39-42>
2. Matsumura K., Fukuda R. Recent developments of non-oriented electrical steel sheets // IEEE Transactions on Magnetics, vol. 20, no. 5, pp. 1533-1538, September 1984. DOI: 10.1109/TMAG.1984.1063223
3. Лобанов М.Л. и др. Металлофизика материалов для электромашиностроения. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 144с.
4. Григорьянц А.Г. и др. Комплексная лазерная обработка электротехнической стали // Технология машиностроения. – 2015. – №10. – С. 12-15.

References

1. Plotnikov S.M., Kolmakov V.O. Minimization of losses in the magnetic core due to the optimal thickness of the plates // Journal of Advanced Research in

Technical Science. 2020. No. 19. P. 39-42. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2020-19-39-42>

2. Matsumura K., Fukuda R. Recent developments of non-oriented electrical steel sheets // IEEE Transactions on Magnetics, vol. 20, no. 5, pp. 1533-1538, September 1984. DOI: 10.1109/TMAG.1984.1063223
3. Lobanov M.L. et al. Metal physics of materials for electrical engineering. – Ekaterinburg: Publishing Ural University, 2019. – 144 p.
4. Grigoryants A.G. et al. Complex laser processing of electrical steel // Mechanical engineering technology. – 2015. – No.10. – P. 12-15.

Плотников Сергей Михайлович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Систем обеспечения движения поездов, Красноярский институт железнодорожного транспорта (филиал ИрГУПС), г.Красноярск, Россия, smplonikov@rabler.ru	Plotnikov Sergey Mikhailovich – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the department of System for train traffic, Krasnoyarsk Institute of Railway Transport (Branch of IrGUPS), Krasnoyarsk, Russia, smplonikov@rabler.ru
--	---

Received 10.09.2020