

УДК 669.14.018

Некоторые аспекты повышения свойств электротехнических сталей

Губанов Олег Михайлович

gubanov_oleg81@mail.ru

ПАО АФК «Система», Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрено формирование микроструктуры динамной стали при отжиге со скоростным нагревом, а также изменение разноструктурности по итогам данного отжига. Показано, что проведение отжига с применением предварительного скоростного нагрева позволяет стабилизировать структуру динамной стали с получением минимальной разноструктурности. Рассмотрен вопрос повышения совершенства текстуры трансформаторной стали посредством селективного роста зерен с наименьшими отклонениями от требуемой текстуры Госса за счет создания условий их предпочтительного роста при пониженных температурах прохождения вторичной рекристаллизации. Показано, что данный эффект характерен для различных исходных технологических схем производства и может быть уточнен применительно к величине степени обжатия при холодной прокатке, а также характера получения и распределения ингибиторной фазы. Сделаны выводы, что полученные результаты можно применять при проектировании технологии получения электротехнических сталей с повышенными свойствами.

Ключевые слова: электротехническая сталь, текстура, микроструктура, удельные магнитные потери, разноструктурность, скоростной нагрев, отжиг, текстура Госса, вторичная рекристаллизация, крупное зерно, выдержка, дробление лазером

Some aspects of improving the properties of electrical steels

Gubanov Oleg Mikhailovich

gubanov_oleg81@mail.ru

PJSCF "Sistema", Moscow, Russia

Abstract. The formation of the microstructure of dynamo steel during annealing with high-speed heating, as well as the change in grain size variation as a result of this annealing, are considered. It is shown that annealing using preliminary high-speed heating allows stabilizing the structure of dynamo steel with obtaining minimal grain size variation. The issue of improving the perfection of the texture of transformer steel by selectively growing grains with the smallest deviations from the required Goss texture by creating conditions for their preferential growth at low temperatures of secondary recrystallization is considered. It is shown that this effect is characteristic of various initial technological schemes of production and can be clarified in relation to the magnitude of the degree of compression during cold rolling, as well as the nature of the formation and distribution of the inhibitor phase. Conclusions are made that the obtained results can be used in designing the technology for producing electrical steels with improved properties.

Keywords: electrical steel, texture, microstructure, specific magnetic losses, grain size variation, high-speed heating, annealing, Goss texture, secondary recrystallization, coarse grain, soaking, laser processing

Введение. Электротехнические стали по способу применения делятся на два класса: работающие в статичном магнитном поле (трансформаторные стали) и работающие во вращающемся магнитном поле (динамные стали). Различия в применении обусловлены текстурой материала, а именно совокупностью ориентировок зерен относительно плоскости и направления прокатки листового материала. Так, для динамных сталей требуется высокая магнитная изотропность материала, что подразумевает приблизительно однородное распределение текстурных компонент в объеме вращающегося магнитопровода, тогда как для трансформаторных сталей требуется максимальная анизотропия и строгое соответствие энергетически выгодных компонент текстуры направлению прилагаемого внешнего магнитного поля [1].

Имеющиеся требования по текстурному состоянию обуславливают технологическую схему производства и итоговую микроструктуру готовой стали. В динамной стали в условиях требований к изотропности материала, снижение удельных магнитных свойств, как основного показателя эффективности работы электроагрегатов, обеспечивается за счет снижения вихретоковой составляющей потерь посредством увеличения содержания легирующих элементов, повышающих удельное электросопротивление, и оптимизации среднего размера зерна при одинаковой толщине листов магнитопровода. Поскольку влияние размера зерна на магнитные потери нелинейно, то имеются эмпирически выявленные области оптимальных значений для каждой группы легирования динамной стали [2]. Однако проведенные исследования говорят, что в условиях высокой стабильности по химическому составу и среднему размеру зерна, удельные магнитные свойства данной стали могут иметь довольно значительный разброс внутри каждой из производимых марок. Одним из направлений стабилизации и общего улучшения магнитных свойств является снижение разнотекстурности динамной стали, включая использование методов скоростного нагрева [3–5].

Применительно к трансформаторной стали, в вопросе снижения удельных магнитных потерь, помимо снижения толщины листов магнитопровода, наибольшее значение имеет высокая анизотропия стали с получением благоприятных ориентировок текстуры [6]. При высоком текстурном совершенстве материала, размер зерна и разнотекстурность в трансформаторной стали являются факторами второго порядка, а для проката, проходящего финишное дробление магнитных доменов, например лазером, указанные параметры вообще утрачивают свою значимость.

Таким образом, в качестве перспективных направлений повышения магнитных свойств для динамной стали можно выделить снижение разнотекстурности, а для трансформаторной — снижение разориентировки текстуры Госсса.

Материалы и методы. Для исследований были отобраны образцы динамной стали двух групп легирования с содержанием Si 0,63 и 3,06 % (масс.) в толщине 0,5 мм, а также образцы трансформаторной стали в толщине 0,27 мм.

Динамная сталь нагревалась в лабораторных условиях со скоростью порядка 300 °C/с до различных температур от 760 до 1030 °C и охлаждалась

со скоростью свыше $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ до комнатной температуры. Далее она нагревалась в лабораторных печах со скоростью $15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ до температуры выдержки, которая подбиралась равной температуре скоростного нагрева. Время от начала нагрева до завершения выдержки подбиралось опытным путем с целью получения микроструктуры стали со сходным средним размером зерна, но с различной разнотернистостью. После выдержки образцы охлаждались со скоростью свыше $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

По завершении обработки производился анализ микроструктуры на оптическом микроскопе Leica при помощи специализированного программного комплекса Tixomet.

Рассмотрены максимальный и средний размеры зерна (d_{max} и d_{cp} соответственно), а также коэффициент разнотернистости Kp , который определяется как отношение $d_{\text{max}} / d_{\text{cp}}$ [7].

Для сравнения изменения коэффициента разнотернистости и удельных магнитных потерь в различных условиях наиболее удобно их прирост рассчитывать в процентах относительно меньшего значения в рамках партий с одинаковым или сопоставимым средним размером зерна.

Образцы трансформаторной стали с содержанием Si 3,17 % (масс.) длиной 800 мм отжигались одним пакетом в лабораторной трубчатой печи с применением градиентного отжига. Градиент температуры в печи заранее определялся при помощи термопары с составлением эталонной карты распределения температур и получением фактического диапазона $750\text{--}1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ в защитной атмосфере. Общая длительность лабораторного отжига составляла 7 часов 15 минут, где 1 час 15 минут — время выхода на режим, 6 часов — время выдержки, далее печь отключалась и остывание образцов происходило вместе с печью.

Полученные образцы проходили травление в растворе соляной кислоты для выявления макрозерна. Результаты сравнивались с эталонной картой распределения температур с фиксацией температуры начала вторичной рекристаллизации.

Для определения текстуры образец подвергся обработке в растворе пикриновой и азотной кислот до получения характерных ямок травления, идентифицирующих текстурную ориентировку каждого зерна. Далее при помощи гониометра определялись углы отклонения от направления и плоскости прокатки основных параметров решетки для каждого выбранного зерна. Измерение магнитных свойств производилось на установке магнитных измерений BROCKHAUS MPG 100 D по стандартным методикам. В качестве сравнительной характеристики выбран основной нормируемый для динамной стали показатель — $P_{1,5/50}$.

Результаты. Результаты измерений среднего размера зерна, коэффициента разнотернистости, магнитных потерь в динамной стали, а также их изменений представлены в табл. 1.

По результатам лабораторного отжига было выявлено, что для трансформаторной стали различных технологических маршрутов производства

температура начала вторичной рекристаллизации различна и может колебаться в интервале 830–1030 °С. Повышение температуры отжига относительно начала вторичной рекристаллизации приводит к постепенному измельчению структуры. Анализ разориентировки отдельных зерен представлен в табл. 2.

Таблица 1

**Изменение параметров микроструктуры и магнитных свойств
в динамной стали**

Содержание Si, % (масс.)	Номер партии	Средний размер зерна, мкм	Kp	$P_{1,5/50}$, Вт/кг	ΔKp , %	$\Delta P_{1,5/50}$, %
0,63	1	22	2,71	7,88	–	–
			3,98	8,35	46,70	5,94
			4,57	8,39	15,0	0,46
	2	27	4,20	7,46	–	–
			5,18	7,48	23,40	0,27
			6,87	7,61	32,75	1,80
3,02	3	29	3,12	4,42	–	–
			4,97	4,70	59,45	6,32
0,63	4	74–76	2,09	6,94	–	–
			2,73	6,99	30,53	0,73
	5	157–160	1,84	7,68	–	–
			2,04	7,70	10,77	0,23

Таблица 2

**Результаты определения разориентировки отдельных зерен
в трансформаторной стали**

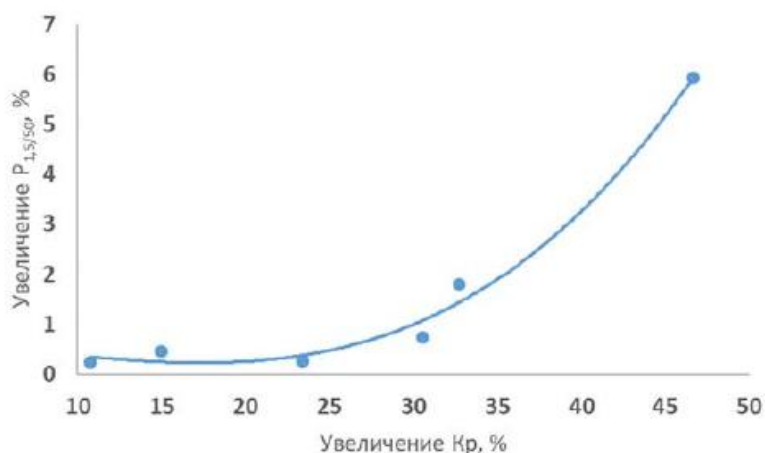
№ п/п	Угол отклонения от плоскости прокатки, град	Угол отклонения от направления прокатки, град
<i>Крупные зерна</i>		
1	0	1
2	0	3
3	0	7
4	0	3
5	2	15
6	2	2
7	0	3
8	1	20
9	0	0
<i>Среднее</i>	0,6	6

Окончание табл. 2

№ п/п	Угол отклонения от плоскости прокатки, град	Угол отклонения от направления прокатки, град
<i>Мелкие зерна</i>		
10	8	14
11	11	12
12	0	5
13	0	20
14	11	12
15	0	4
16	0	13
17	7	8
18	9	10
19	0	5
<i>Среднее</i>	4,6	10,3

Обсуждение полученных результатов. Анализ полученных данных показал, что во всех партиях динамной стали с увеличением K_p , при остальных одинаковых параметрах микроструктуры, увеличиваются удельные магнитные потери (см. рисунок). Поскольку сравнение происходило в пределах одной технологической партии, то химический состав, параметры выплавки, горячей и холодной прокатки для всех образцов партии были идентичными и их

в данном случае можно не рассматривать, как и параметры сформированных на данных этапах неметаллических включений.



Зависимость изменения удельных магнитных потерь динамной стали от изменения разнородности

Таким образом, целесообразным является подбор параметров термообработки, которые наряду с получением целевого среднего размера зерна, обес-

печивают минимальную разнотекстурность. Одним из наиболее перспективных способов управления разнотекстурностью при прохождении собирательной рекристаллизации в динамной стали является дополнение финишного рекристаллизационного отжига операцией предварительного скоростного нагрева.

Для трансформаторной стали анализ полученных данных показывает, что наиболее крупные зерна, полученные в момент выдержки при температуре близкой к температуре начала собирательной рекристаллизации, имеют относительно низкую разориентировку со средним отклонением плоскости $\{110\}$ от плоскости прокатки $0,6^\circ$, и отклонением направления $\langle 001 \rangle$ от направления прокатки 6° .

Анализ разориентировки мелких зерен, которые сформировались во время выдержки с превышением температуры начала вторичной рекристаллизации на 170°C и более показал, что эти зерна имеют среднее отклонение плоскости $\{110\}$ от плоскости прокатки $4,6^\circ$, и отклонение направления $\langle 001 \rangle$ от направления прокатки $10,3^\circ$. Для данного участка образца можно отметить, что лишь единичные зерна имеют углы отклонения по совокупности параметров до 5° .

Таким образом, можно утверждать, что гипотеза о получении более острой текстуры Госсса с укрупнением размера зерна подтверждается. Результатом полученных данных можно считать, что при реализации отжига в промышленных печах следует избегать быстрого нагрева до критических температур, когда происходит рост зерен всех ориентировок или зерен с большими отклонениями от строгой текстуры Госсса, а также длительной фиксации в данном критичном интервале температур, которая возникает вследствие замедления скорости нагрева по мере приближения к температуре рафинировки трансформаторной стали.

Заключение. Произведена количественная оценка влияния разнотекстурности в динамной стали на вклад в формирование удельных магнитных потерь при различном размере зерна. Изменение $P_{1,5/50}$ в данных условиях составило от 0,02 до 0,51 Вт/кг, что составляет от 0,23 до 6,4 % от первоначального значения. Таким образом, показано, что разнотекстурность является значимой характеристикой, с ростом которой происходит рост удельных магнитных потерь, полученные данные выражены графически. Для трансформаторной стали показано, что зерна формирующиеся в момент выдержки при температуре близкой к температуре начала вторичной рекристаллизации, имеют более крупный размер. Также они характеризуются относительно низкой разориентировкой и малым отклонением от ребровой текстуры, что является обязательным условием получения качественной трансформаторной стали с низкими удельными магнитными потерями. Полученные результаты могут быть использованы при промышленной организации производства, в частности на участках отжига при разработке режимов отжига для улучшения итоговых магнитных свойств электротехнических сталей.

Список источников

- [1] Казаджан Л.Б. *Магнитные свойства электротехнических сталей и сплавов*. Москва, Наука и технологии, 2000, 224 с.
- [2] Миндлин Б.И., Настич В.П., Чеглов А.Е. *Изотропная электротехническая сталь*. Москва, Интермет Инжиниринг, 2006, 240 с.
- [3] Gubanov O.M., Romanenko D.N., Shkatov V.V., Kozhukhov A.A. Formation of non-uniform grain structure of steel in the process of heat treatment and method of evaluation of microstructure with significantly non-uniform grain. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2017, no. 5 (20), pp. 996–1001.
- [4] Губанов О.М., Чеглов А.Е., Заверюха А.А. Особенности развития рекристаллизации в изотропной электротехнической стали при скоростном нагреве. *Сталь*, 2013, № 5, с. 78–83.
- [5] Гадалов В.Н., Петренко В.Р., Сафонов С.В., Губанов О.М., Скрипкина Ю.В. *Металловедение сварки с лабораторным практикумом по технологии конструкционных материалов (ТКМ), специальным методам сварки и пайки, контролю качества сварных соединений. Тесты, контрольные работы*. Москва, Аргамак - Медиа, 2021, 400 с.
- [6] De Cooman B.C., Speer J.G. *Fundamentals of steel product physical metallurgy*. AIST, 2011, 641 p.
- [7] Губанов О.М., Чеглов А.Е., Камышева Д.Е. Влияние кремния и фосфора на формирование микроструктуры и текстуры изотропной электротехнической стали при скоростном нагреве. *Производство проката*, 2015, № 1, с. 8–13.