



Создание электротехнических сталей

Ю.В. Черников

(Окончание. Начало см. ЭП, № 12, 2013 г.)

В результате многочисленных экспериментов, проделанных в период 1930–1935 гг., американскому исследователю и изобретателю Норману П. Госсу (Кливленд, штат Огайо) удалось путем двукратной холодной прокатки и термообработки получить трансформаторную сталь, имевшую при содержании кремния 3–3,5 % весьма высокие магнитные свойства вдоль направления прокатки. На эту технологию им был получен патент США № 1965559 «Электротехническая листовая сталь, способ и оборудование для ее производства и испытания» (заявка – 1933 г., опубликовано – 1934 г., автор Н.П. Госс, патентообладатель – фирма Cold Metal Process) [1]. Согласно этому патенту процесс изготовления состоял из отжига горячекатаного материала при температуре 900 °С, холодной прокатки с уменьшением толщины на 60 %, вторичного отжига при температуре 900 °С, повторной холодной прокатки с уменьшением толщины на 60 %, отжига сначала при температуре 1100 °С, а затем – при 700 °С для уменьшения старения. Максимальная магнитная проницаемость в первых образцах этой стали составляла 15000 Гс/Э, что в 1,5–2 раза выше проницаемости лучшей марки горячекатаной трансформаторной стали [2].

В 1937 г. американский ученый Вильямс в результате лабораторных исследований доказал, что высокие магнитные характеристики стали, полученной Н. Госсом, объясняются наличием в ней направленного расположения кристаллитов, полученного при определенных режимах холодной прокатки и термообработки. В холоднокатаной стали Госса направление легкого намагничивания и наименьшей коэрцитивной силы в ее элементарной ячейке (ребро объемно-центрированного куба кристаллической решетки [3]) совпадает с направлением прокатки, направление трудного намагничивания находится под углом 55° к

направлению прокатки, а ось направления среднего намагничивания – под углом 90° к направлению прокатки. Последние два направления лежат в поперечной плоскости куба. Такая текстура получила название «ребровая», или «госсовская».

После публикации сообщения Госса о результатах его работы были предложены многие методы получения текстурованных сталей холодной прокаткой и отжигом [4]. Сам Госс в 1937 г. изготовил новые образцы, применяя прокатку при температуре 800 °С, а также отжиг, холодную прокатку и окончательный отжиг при температуре 1100 °С. В 1938 г. Хименц применял при прокатке последовательное понижение температуры, заканчивая процесс холодной прокаткой. Полученный материал затем отжигался при температуре 1250 °С. В 1941 г. Карпентер предложил обезуглероживать сплав перед холодной прокаткой отжигом горячекатаных листов с неудаленной окалиной и с последующим отжигом при температуре 800 °С в регулируемой атмосфере для предотвращения загрязнения. В результате всех этих исследований было выявлено, что наилучший результат получается при комбинировании текстурирования материала и очистки его на различных стадиях изготовления: от выплавки до последнего отжига.

Промышленное производство текстурованной трансформаторной стали было освоено в 1940–1945 гг. сначала в США, а затем и в европейских странах.

В СССР важные исследования по разработке технологии производства холоднокатаной трансформаторной стали были выполнены в 1944–1945 гг. Центральной заводской лабораторией Верх-Исетского металлургического завода (ВИМЗ) и Центральным научно-исследовательским институтом черной металлургии (ЦНИИЧМ). Несмотря на то, что производство холоднокатаной трансформаторной стали в США осуществлялось с 1942 года, опубликованные данные о ее свойствах и технологии производства отсутствовали. Поэтому разработка и освоение про-

изводства трансформаторной стали в СССР базировались, в основном, на данных отечественных исследований. После удачных лабораторных экспериментов специалисты ВИМЗ изготовили первую в СССР партию холоднокатаной трансформаторной стали толщиной 0,35 мм, удельные потери в которой при $B_m=10000$ Гс и частоте 50 Гц были равны 0,79 Вт/кг [5].

В Советском Союзе массовое производство холоднокатаной трансформаторной стали впервые было организовано на Ленинградском сталепрокатном заводе в 1947 г. (лента толщиной 0,08 мм), затем в 1949 г. на Новосибирском металлургическом заводе (листы толщиной 0,35 и 0,50 мм). В дальнейшем производство холоднокатаной трансформаторной стали было освоено на московском заводе «Электросталь» (с термической обработкой в протяжных печах в атмосфере электролитического водорода), на заводе «Запорожсталь» и на Магнитогорском металлургическом комбинате.

Трансформаторная сталь с ребровой текстурой в разных странах изготавливалась под различными названиями (например, в СССР – ХВП, ХТ18, Э310, Э320, Э330, Э330А), однако химический состав таких сталей во всех странах почти одинаков (содержание кремния 2,8–3,5 %, остальное – железо и примеси). Различия в магнитных свойствах объясняются степенью совершенства текстуры, содержанием вредных примесей и особенностями режимов холодной прокатки и термической обработки.

Снижение вредных примесей (обезуглероживание до 0,005 %), совершенствование режимов выплавки, холодной прокатки и термической обработки, а также улучшение качества поверхности позволили к концу пятидесятих годов прошлого столетия повысить максимальную магнитную проницаемость промышленной трансформаторной стали с ребровой текстурой до 50000–60000 Гс/Э, а потери на гистерезис при $B=15000$ Гс снизить до 0,4 Вт/кг при частоте 50 Гц. Анизотро-



тропия потерь энергии стали с ребровой текстурой (отношение потерь под углом 90° к потерям под углом 0° по направлению прокатки) составляет примерно 2,5–3,0.

Наряду с высокими магнитными свойствами текстурованные стали имеют низкий коэффициент старения (0–3 %), высокую пластичность, высокий коэффициент заполнения и высокое качество поверхности. Поверхность текстурованной трансформаторной стали, как правило, имеет высокие электроизоляционные и антикоррозионные свойства, получаемые путем специальной обработки.

Следует отметить, что применение сталей, обладающих магнитной анизотропией, требует такой конструкции магнитопровода, при которой магнитный поток проходит только в направлении наилучших магнитных свойств, т.е. в направлении прокатки. Выполнение поставленного условия возможно в результате применения, например, ленточных сердечников.

Применение текстурованных сталей в мощных трансформаторах позволяет уменьшить потери энергии на 20–30 %, снизить стоимость трансформаторов на 5 %, вес – на 10 %, а расход стали – на 20 %. Для трансформаторов малой мощности выигрыш в весе еще более значителен.

Важным для электромашиностроительных заводов (потребителей) также является изготовление электротехнических сталей в виде ленты, смотанной в рулоны, что позволяет механизировать и автоматизировать поточное производство на этих заводах, а также у изготовителя – на металлургических. Поэтому начиная с 1940–1948 гг. стала широко применяться холодная рулонная прокатка электротехнической стали в виде ленты на непрерывных или реверсивных станах. Создание и промышленное освоение в 30–50-х годах прошлого столетия холоднокатаной анизотропной электротехнической стали с ребровой текстурой было выдающимся достижением в области разработки магнитомягких материалов, однако расширение области ее применения и увеличение количества марок выявили некоторые, не всегда положительные, особенности ее использования, а именно:

- высокие магнитные свойства холоднокатаной стали с ребровой текстурой получают только вдоль направления прокатки, в то время как для магнитопроводов электрических машин с круглой формой статора и ро-

тора необходимо, чтобы анизотропия магнитных свойств была минимальна, так как выполнить требование параллельности направлений намагничивания и прокатки в этом случае достаточно трудно [6];

- магнитные свойства трансформаторной стали, имеющей ребровую текстуру, сильно ухудшаются с уменьшением толщины ленты до 0,15–0,10 мм и менее.

В свете указанных причин усилия исследователей были направлены на создание холоднокатаной стали, имеющей одинаково высокие магнитные свойства как вдоль направления прокатки, так и поперек его, и при этом не теряющей свои магнитные характеристики при уменьшении толщины холоднокатаной ленты до 0,1 мм и менее. И такая изотропная холоднокатаная сталь была создана.

В 1956 г. немецкий исследователь Фриц Ассмус и его коллеги по работе в фирме «Вакуумшмелце» (г. Ханау, земля Гессен) провели лабораторные исследования, в результате которых была получена сталь в виде ленты толщиной 0,04 мм с достаточно высокими магнитными свойствами как вдоль, так и поперек направления прокатки. Полученный эффект в этой стали был достигнут за счет того, что в ней была сформирована кубическая текстура металла. При такой текстуре вдоль и поперек направления прокатки ориентируются ребра объемно-центрированного куба кристаллической решетки (направления легкого намагничивания в ее элементарной ячейке) [7]. В каждом из них электромагнитные свойства стали с кубической текстурой аналогичны свойствам стали с ребровой текстурой в направлении прокатки.

В процессе этих лабораторных исследований сверхтонкая электротехническая лента с кубической текстурой была получена способом многократной холодной прокатки с обжатием 50–60 % с конечным обжигом в атомарном сухом водороде при температуре 1100–1300 °С с применением газопоглотителей и катализаторов.

В конце 1957 г. в США одновременно две фирмы «Дженерал электрик» и «Вестингауз электрик» получили первые ленты толщиной 0,31 мм и 0,02–0,03 мм, имевшие кубические текстуры и высокие магнитные свойства.

В 1958–1960 гг. в СССР, в ЦНИИЧМ и Уральском НИИЧМ также проводились эксперименты с целью получения стали с кубической текстурой. В результате была предложена сталь марки ЗСТА

с высокой магнитной проницаемостью ($\mu_0=3000\text{--}4000$ Гс/Э; $\mu_m=30000\text{--}40000$ Гс/Э) и низкой коэрцитивной силой ($H_c=0,08$ Э) как вдоль, так и поперек направления прокатки при толщине ленты 0,05–0,10 мм [8].

Следует отметить, что в конце 50-х годов XX века в мировой практике отсутствовала надежная технология промышленного производства трансформаторной стали с кубической текстурой в виде ленты, и ее еще предстояло создать.

Таким образом, в первой половине прошлого столетия были созданы и освоены в промышленном производстве электротехнические стали, обладающие высокими магнитными, электрическими и механическими свойствами. Впереди был долгий и успешный путь усовершенствования, направленный на повышение качества этих сталей путем уменьшения в них вредных примесей, разработки и использования оптимальных режимов прокатки и термической обработки, но это – тема уже другой статьи.

Литература:

1. US Pat. № 1965559. *Electrical sheet and method and apparatus for its manufacture and test* / Goss N.P., (Appl. 8/7/33), 1934.
2. Дубров Н.Ф., Лапкин Н.И. *Электротехнические стали*. – М.: ГНТИ ЛИТ. по черной и цветной металлургии, 1963. – С. 50.
3. *История электротехники* / Под ред. И.А. Глебова. – М.: Изд-во МЭИ. 1999. – С. 380.
4. Бозорт Р.М. *Ферромагнетизм*. – М.: Изд-во Иностранной литературы, 1956. – С. 78.
5. Гольдман А.Л., Чернобрикина Е.С., Гробман Р.М. *Холоднокатаная трансформаторная сталь* // «Сталь», 1947, № 3. – С. 231–235.
6. *Электрические машины. Электротехнические материалы, применяемые в электрических машинах* / http://www.induction.ru/library/book_001/glava_1/1-5.html.
7. Там же, где 2. – С. 58.
8. Кадыкова Г.Н., Соснин В.В. *Ленточная трансформаторная сталь новой марки (ЗСТА) толщиной 0,20–0,02 мм с пониженными потерями*. – *Вопросы радиоэлектроники, сер. «Радиодетали и узлы»*, 1960, вып. 3.

Полная версия статьи будет опубликована на сайте журнала «Электропанорама» www.elektropanorama.com.ua.