

**Влияние химического состава на магнитные свойства электротехнической стали,
полученной методом совмещенного литья–прокатки**

Студенты гр. 10402319: Цзян Хао, Чжоу Цзюньцзе
Научный руководитель – Зеленин В.А.
Белорусский национальный технический университет
г.Минск

Бестекстурная электротехническая сталь представляет собой магнитомягкий сплав железа с кремнием с низким содержанием углерода. Она используется главным образом в качестве материала сердечников роторов электродвигателей и генераторов. В последние годы широкое использование бытовой техники и электротранспортных средств привели к повышению требований к характеристикам электротехнической стали. Петля гистерезиса магнитомягких материалов должна быть как можно более узкой и высокой для снижения потерь на перемагничивание. Значение их коэрцитивной силы H должно быть низким, а магнитная проницаемость ($\mu = B/H$, где B – индукция) иметь высокое значение.

На магнитные свойства электротехнической стали влияет ее химический состав, размер зерна, кристаллическая текстура и включения [1, 2].

1. Влияние титана на магнитные свойства электротехнической стали

В работе [1] исследовали влияние содержания титана на свойства электротехнической стали. Химические составы образцов экспериментальных сталей приведены в таблице 1. Химический состав образца 1 соответствовал составу товарной электротехнической стали. Для изучения влияния титана на ее микроструктуру и свойства вводили от 0,002 %, до 0,118 % Ti. Химические составы экспериментальных сталей приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Химические составы экспериментальных сталей

№ образца	C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	Als, %	Ti, %	N, %	O
1	<0.001	0.30	0.29	0.100	0.0042	0.27	≤0.001	0.0013	0.0032
2	<0.001	0.32	0.30	0.098	0.0041	0.28	0.002	0.0015	0.0018
3	<0.001	0.33	0.28	0.098	0.0045	0.26	0.004	0.0013	0.0010
4	<0.001	0.32	0.30	0.097	0.0042	0.26	0.005	0.0013	0.0024
5	<0.001	0.32	0.29	0.098	0.0042	0.27	0.009	0.0014	0.0022
6	<0.001	0.28	0.29	0.098	0.0044	0.27	0.015	0.0013	0.0011
7	<0.001	0.29	0.28	0.100	0.0042	0.26	0.042	0.0012	0.006
8	<0.001	0.32	0.30	0.098	0.0045	0.28	0.072	0.0013	0.0032
9	<0.001	0.29	0.29	0.097	0.0042	0.27	0.118	0.0011	0.0012

Бестекстурную электротехническую сталь с различным содержанием титана получали методом вторичной холодной прокатки и отжига. Результаты исследований влияния легирования титаном на микроструктуру и магнитные свойства электротехнической стали приведены на рисунках 1 и 2.

На рисунке 1 показана зависимость между потерями на перемагничивание в переменном магнитном поле и содержанием титана. При содержании Ti до 0,015 % (образцы 1–6) размер зерен уменьшается (рисунок 3), а потери в железе находятся в пределах от 4,6 до 5,2 Вт/кг.

W, Вт/кг

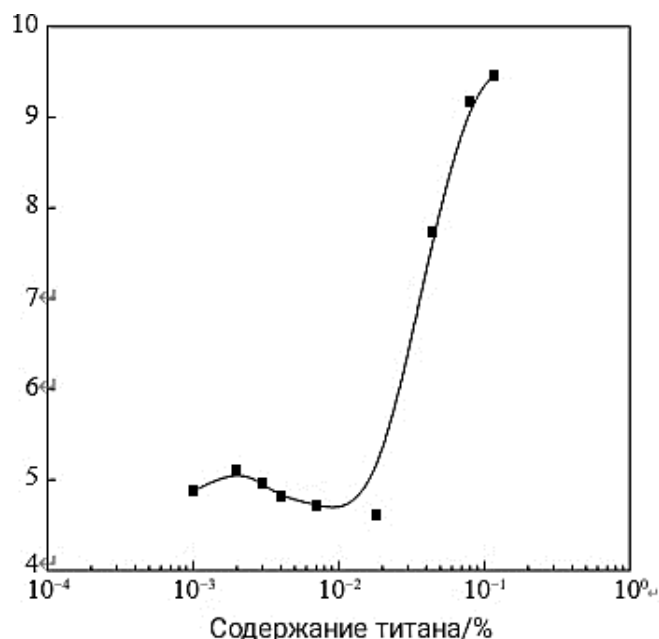


Рисунок 1 – Связь между потерями на перемагничивание (W) и содержанием титана

При содержании титана выше 0,015 % (образцы 7–9), его равноосные зерна меняют форму на деформированную, а количество включений в стали увеличивается, что приводит к значительному увеличению потерь на перемагничивание.

B, Тл

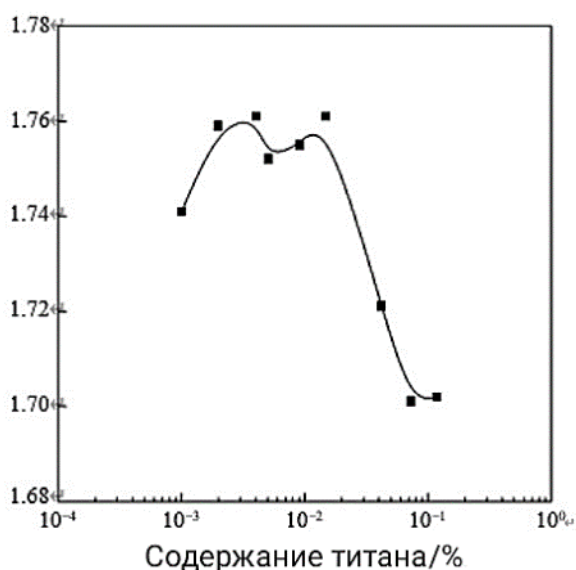


Рисунок 2 – Влияние содержания титана на индукцию насыщения B

Индукция насыщения B стали сначала колеблется с увеличением содержания титана, а затем сильно снижается, как показано на рисунке 2. Когда содержание титана в образце не превышает 0,015 % (образцы 1–6), индукция B поддерживается на относительно высоком уровне, от 1,74 до 1,76 Тл, а при содержании титана более 0,015 %, индукция снижается. При содержании титана более 0,072 %, индукция B составляет 1,70 Тл, а потери на перемагничивание превышают 9,3 Вт/кг.

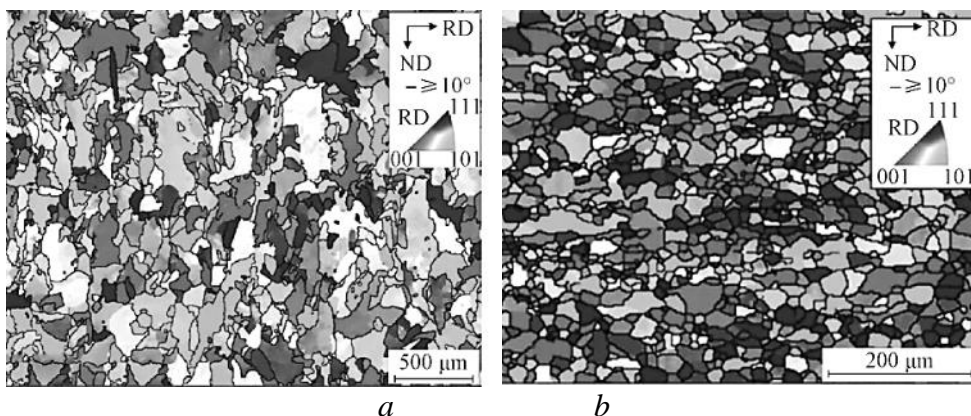


Рисунок 3 – Структура электротехнической стали Fe-0,7 % Si:
a – технология литьё–прокатка; *b* – традиционная технология

Установлено, что средний размер зерна отожженной стали при содержании титана до 0,015 % составляет 350 мкм, а при содержании титана более 0,015 % структура деформирована и характеризуется разнотернистостью, т.е. наличием крупных зерен размерами 60–80 мкм, окруженных зернами размерами от 5 до 30 мкм. При содержании до 0,015 % титан выделяется в виде карбонитрида и располагается по границам крупных зерен, а при содержании титана >0,015 % – в виде железо-фосфида титана в зернах и по границам зерен, препятствуя их росту.

При содержании титана до 0,015 % индукция насыщения стали повышается, что связано с более мелкозернистой ее структурой. Избыточное содержание титана значительно ухудшает свойства стали, поэтому необходимо контролировать содержание титана в шихте (чугуне, стальном ломе) при выплавке стали.

2. Влияние олова или сурьмы на магнитные свойства электротехнической стали

В [2] исследовано влияние отжига на магнитные свойства бестекстурной электротехнической стали с содержанием 2,68% Si (сталь А) и стали, дополнительно содержащей 0,1% Sn (сталь В). Введение Sn привело к снижению потерь на перемагничивание (рисунок 4). Наименьшие потери, составившие 10,2 Вт/кг, были получены отжигом при 900 °С. С повышением температуры отжига разница между потерями в сталях, А и В постоянно снижалась.

W, Вт/кг

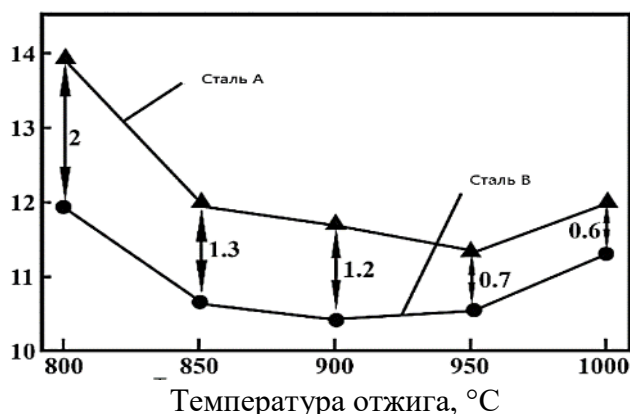


Рисунок 4 – Изменения потерь на перемагничивание при различных температурах отжига

Установлено, что введение 0,075% Sn в сталь с 3%Si снижает потери с 2,26 Вт/кг до 2,00 Вт/кг и повышает индукцию с 1,674 Тл. до 1,729 Тл. Введение Sb в сталь со сверхнизким содержанием серы приводит к сегрегации Sb на поверхности стального листа, и по границам

зерен, тем самым препятствуя азотированию поверхности во время отжига и образованию нитрида алюминия (AlN).

Показано, что на свойства электротехнической стали влияет как ее легирование Ti, Sn или Sb, так и размер зерна, температура нормализации, количество проходов и степень обжатия при холодной прокатке, температура окончательного отжига и др. факторы.

Так, использование совмещенной технологии *литья–прокатки* листовой стали на два порядка снижает время ее кристаллизации по сравнению с обычным литьем. Легирующие элементы образуют при этом пересыщенные твердые растворы α -Fe при отсутствии фазы γ -Fe. Структура прокатанной по совмещенной технологии *литья–прокатки* бестекстурной электротехнической стали состава Fe-0,7% Si показана на рисунке 3. Средний размер зерна составляет около 35 мкм. Повышенная протяженность границ зерен оказывает сильное влияние на снижение потерь на перемагничивание в высокочастотных магнитных полях (до 3 кГц). Это связано с высоким переходным электрическим сопротивлением между зернами ввиду сегрегации Sb или карбонитридатитана по границам зерен, что снижает плотность токов Фуко. Индукция насыщения достигает значений выше 1.80 Т, а потери на перемагничивание не выше 6 Вт/кг.

Заключение

Совмещенная технология *литья–прокатки* имеет существенные преимущества перед обычным процессом прокатки стального листа. Сверхбыстрая кристаллизация при совмещенной прокатке позволяет получить бестекстурную тонколистовую электротехническую сталь с повышенными электромагнитными свойствами и потерями на перемагничивание не выше 6 Вт/кг. Легирование электротехнической стали состава Fe-0,7% Si титаном, оловом или сурьмой, образующих твердые растворы с α -Fe, позволяют повысить переходные электрические сопротивления между зернами ввиду сегрегации Sb или карбонитридатитана по границам зерен, что снижает плотность токов Фуко в стали в высокочастотных магнитных полях. Снижение потерь позволит повысить КПД электродвигателей, эффективность использования бытовой техники и пробег электротранспортных средств без перезарядки тяговых аккумуляторных батарей.

Список использованных источников

1. Ли, Цзинцай Влияние содержания титана на микроструктуру и магнитные свойства нетекстурированной электротехнической стали / Цзинцай Ли, Янь Синь // Железо, сталь, ванадий и титан, 2021, №42(04). – Р. 156–161.

2. Прогресс исследований олова или сурьмы в бестекстурной электротехнической стали / Шаоян Чу, GAN Yong [и др.] // China Metallurgy: 1-7 [2022-03-15]. DOI: 10.13228 /j. boyuan. issn1006-9356.20210820.

3. Хао. Цзян Развитие технологии прокатки стального листа в Китае. / Хао Цзян; науч. рук. В.А. Зеленин// Литьё и металлургия 2021 [Электронный ресурс]: сборник. научн. работ IV Международной научно-практической интернет конференции студентов и магистрантов, 18–19 ноября 2021 г / ред.: А.П. Бежок, И.А. Иванов. – Минск: БНТУ, 2021 (в печати).