



УДК 669.621.3

## ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ МАШИН

### OBTAINING OF ELECTROTECHNICAL ISOTROPIC STEEL FOR RAPID MACHINES

**Окорокова Ольга Вячеславовна**

аспирантка,  
Липецкий государственный технический университет,  
Металлургический институт  
ol4ek88@mail.ru

**Цыганов Игорь Анатольевич**

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой физического металловедения,  
Липецкий государственный технический университет,  
Металлургический институт

**Аннотация.** В данной статье предложена обработка изотропной электротехнической стали. Проанализированы изменения свойств, представлены результаты по основным параметрам, влияющим на свойства электротехнических полос для высокочастотных машин.

**Ключевые слова:** удельные потери, магнитная индукция, текстура, размер зерна.

**Okorokova Olga Vyacheslavovna**

Graduate Student,  
Lipetsk state technical university,  
Metallurgical institute  
ol4ek88@mail.ru

**Tsyganov Igor Anatolyevich**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Head of the department of  
physical metallurgical science,  
Lipetsk state technical university,  
Metallurgical institute

**Annotation.** In this paper we propose processing of isotropic electrical steel. The changes in properties are analyzed, the results are presented for the main parameters that affect the properties of electrical bands for high-frequency machines.

**Keywords:** specific losses, magnetic induction, texture, grain size.

Основным требованием, предъявляемыми к магнитным свойствам готовой высоколегированной электротехнической изотропной стали (ЭИС) с содержанием Si до 3 %, является обеспечение минимальных удельных магнитных потерь при высокой магнитной индукции и низкой анизотропии этих характеристик [1]. Высокочастотные машины работают при частоте 400–10000 Гц. Основные характеристики магнитных свойств – удельные магнитные потери, магнитная индукция. Наиболее важное значение имеют удельные потери, так как при работе происходит нагрев магнитопровода, перемагничивающегося с высокой частотой. Поэтому необходимо ограничивать амплитуду колебаний магнитной индукции. При увеличении частоты поля магнитная проницаемость уменьшается, а удельные потери увеличиваются вследствие увеличения потерь на вихревые токи.

Требования к ЭИС для высокочастотных машин:

1. Высокое электросопротивление материала (высокое содержанием Si, Al).
2. Минимально возможную толщину полосы для определенного диапазона частот.
3. Оптимальный размер зерна после заключительного отжига.
4. Достаточно высокую долю кубической компоненты в текстуре холоднокатаной стали.
5. Высокая доля кубической компоненты.

Для получения стали, удовлетворяющей вышеперечисленным требованиям, необходимо провести однократную холодную прокатку со степенью деформации более 85 % без промежуточного отжига после стандартной обработки. Такая деформационная обработка позволяет получить оптимальный размер зерна после обезуглероживающе-рекристаллизационного отжига, подавляет рост доли ребровой и октаэдрических ориентировок, обеспечивает получение кубической ориентировки до 40 %. Такие изменения прослеживаются для стали химического состава, соответствующего составу стали 4-ой группы легирования (табл. 1).

**Таблица 1** – Химический состав ЭИС 4 группы легирования

Химический состав по элементам, %										
C	Mn	Si	Al	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti	N
0,005	0,26	3,01	0,47	0,007	0,009	0,01	0,01	0,04	0,003	0,004

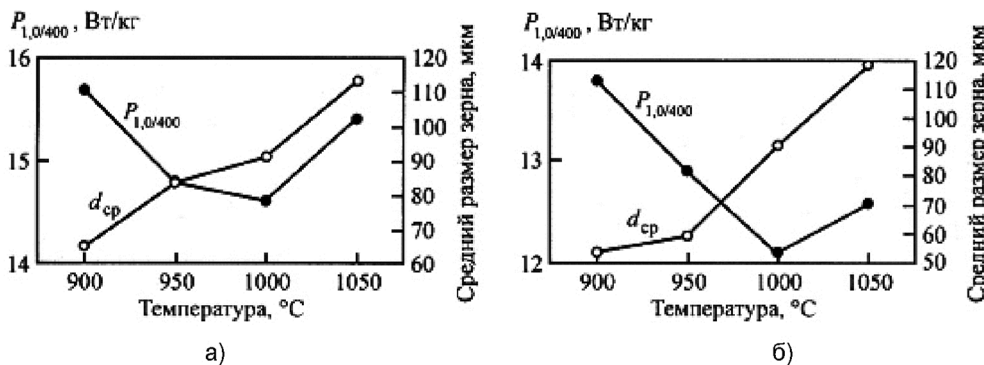
После рекристаллизационного отжига при одинаковых параметрах наблюдается некоторое различие в свойствах полос толщиной 0,27 мм и 0,18 мм. С повышением степени деформации отмечается тенденция к увеличению кубической компоненты (табл. 2) [2].



**Таблица 2** – Текстурные составляющие холоднокатаной ЭИС с разными степенями обжатия

Толщина, мм	Степень обжатия, %	Место съемки, мм	Составляющие текстуры, %					
			{200}	{112}	{220}	{310}	{222}	{321}
0,27	89,2	0,27 (поверхность)	36,3	19,5	0,8	1,2	38,8	3,4
0,18	92,8	0,18 (поверхность)	39,0	17,7	0,4	0,6	39,9	2,4

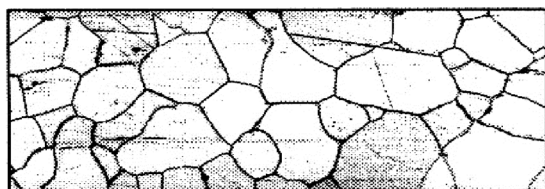
Размер зерна в готовой стали при данных толщинах составляет примерно 90 мкм. Изменение удельных потерь показано на рисунке 1.



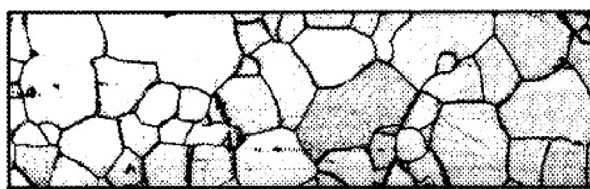
**Рисунок 1** – Зависимость удельных магнитных потерь ( $P_{1,0/400}$ ) и среднего размера зерна для высокочастотных машин от температуры отжига [3]: а – 0,27 мм; б – 0,18 мм

Отметим, что для толщины 0,18 мм наблюдается резкое уменьшение магнитных потерь при стремительном росте зерна. Проанализировав рисунок 1, стоит сказать, что данная обработка позволяет улучшить свойства изотропной стали 4 группы легирования по сравнению с приведенными в ГОСТе 21427-2-83. Для толщины 0,27 мм удельные потери уменьшаются на 5,4 единицы, а значение магнитной индукции увеличивается на 0,6 единиц и составляет 1,53 Тл.

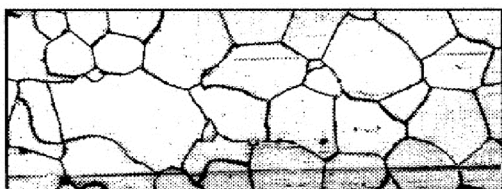
Металлографический анализ ЭИС в толщине 0,27 и 0,18 мм позволил установить величину оптимального размера зерна готовой стали, обеспечивающего получение минимальных удельных магнитных потерь  $P_{1,0/400}$ . Размер зерна готовой ЭИС в толщине 0,27 и 0,18 мм для высокочастотных машин должен составлять примерно 90 мкм.



а) 950 °C ( $d = 85$  мкм,  $P_{1,0/400} = 14,9$  Вт/кг)



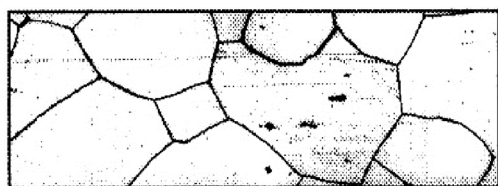
г) 950 °C ( $d = 59$  мкм,  $P_{1,0/400} = 12,9$  Вт/кг)



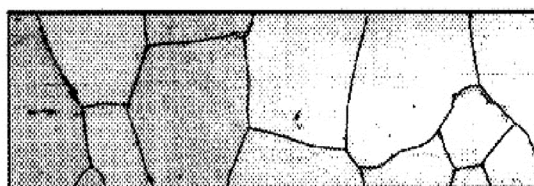
б) 1000 °C ( $d = 92$  мкм,  $P_{1,0/400} = 14,6$  Вт/кг)



д) 1000 °C ( $d = 90$  мкм,  $P_{1,0/400} = 12,1$  Вт/кг)



в) 1050 °C ( $d = 113$  мкм,  $P_{1,0/400} = 15,4$  Вт/кг)



е) 1050 °C ( $d = 120$  мкм,  $P_{1,0/400} = 12,6$  Вт/кг)

**Рисунок 2** – Микроструктура ЭИС (3,01 % Si) толщиной 0,27 и 0,18 мм после отжига в лабораторной печи



Таким образом, параметры и способы обработки позволяют получить ЭИС с улучшенными свойствами.

#### Литература:

1. Поляков М.Ю., Бахтин С.В. Опыт производства высококачественных электротехнических сталей на Новолипецком металлургическом комбинате и основные направления развития производства с учетом требований мирового рынка // Каталог статей «Черная металлургия: Состояние и перспективы. Институту «Черметинформация» – 70 лет». – М. : ОАО «Черметинформация», 2013. – С. 218–229.
2. Милютин В.А. Влияние сильного магнитного поля на эволюцию структуры и кристаллографической текстуры в процессе отжига деформированных и аморфных ферромагнитных металлических сплавов : дис. ... канд. тех. наук (01.04.07) / ИФМ УрО РАН. – Екатеринбург, 2017. – 139 с.
3. Освоение технологии производства новых электротехнических изотропных сталей в ОАО НЛМК / А.Е. Чеглов [и др.] // Сталь. – 2015. – № 10. – С. 62–67.

#### References:

1. Polyakov M.Yu., Bakhtin S.V. Experience of production high-quality electrotechnical staly on Novolipetsk Steel and the main directions of development of production taking into account requirements of the world market//the Catalogue of articles «Ferrous metallurgy: State and prospects. To Chermetininformation institute – 70 years». – М. : JSC Chermetininformation, 2013. – P. 218–229.
2. Milyutin V.A. Influence of strong magnetic field on evolution of structure and crystallographic texture in the course of annealing of the deformed and amorphous ferromagnetic metal alloys : yew. ... Cand. Tech. Sci. (01.04.07) / IFM UrO RAHN. – Yekaterinburg, 2017. – 139 p.
3. Development of the production technology new electrotechnical isotropic staly in JSC NLMK / A.E. Cheglov [etc.] // Steel. – 2015. – № 10. – P. 62–67.