

УДК 669.14.018.54; 669.172.539.382

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ВЫПЛАВКИ, ТЕРМООБРАБОТКИ И ЛЕГИРОВАНИЯ НА МАГНИТО-МЯГКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛИ ТИПА 23X15H7M2

© Владимир Васильевич Глебов, Федор Федорович Репин, Маргарита Анатольевна Глебова

*Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия*

[vgavt@vgavt-nn.ru](mailto:vgavt@vgavt-nn.ru)

*Аннотация.* На основании экспериментальных исследований с использованием программы «Statistica» выполнен анализ влияния способа выплавки, термообработки и легирования на магнито-мягкие свойства мартенсита отпуска стали типа 23X15H7M2.

*Ключевые слова:* аустенит, мартенсит отпуска, термическая обработка, легирование, магнито-мягкие характеристики, статистический анализ данных.

## ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE METHOD OF SMELTING, HEAT TREATMENT, AND ALLOYING ON MAGNETIC SOFT CHARACTERISTICS OF STEEL TYPE 23X15H7M2

© V.V. Glebov, F.F. Repin, M.A. Glebova

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

[vgavt@vgavt-nn.ru](mailto:vgavt@vgavt-nn.ru)

*Abstract.* With the help of the "Statistica" program, the effect of the melting, heat treatment and alloying method on the soft-magnetic properties of martensite of tempering steel of the type 23X15H7M2 is analyzed.

*Key words:* austenite, tempering martensite, heat treatment, alloying, soft-magnetic characteristics, statistical analysis of data.

Сталь 23X15H7M2 разрабатывалась для изготовления магнитных заготовок деталей с заданным расположением магнитных и немагнитных участков, создаваемых локальной термообработкой [1]. Ранее было установлено, что сталь 23X15H7M2 может применяться для изготовления цельных валов электродвигателей с магнитными и немагнитными участками взамен сварных.

Также была показана возможность применения стали 23X15H7M2 для изготовления деталей системы управления и защиты (СУЗ) реактора ВВЭР -1000. Однако, несмотря на то, что использование стали 23X15H7M2 для деталей электрических машин в монолитном исполнении позволяет снизить трудоемкость их изготовления, широкое применение стали

сдерживается недостаточно высоким уровнем физико-механических характеристик мартенсита отпуска стали 23X15H7M2 [2].

Поэтому возникла необходимость в проведении исследований по корректировке химического состава [3], способа выплавки и режима термообработки для повышения физико-механических свойств стали 23X15H7M2 [4].

При выполнении исследовательских работ были выплавлены опытные плавки с введением в состав стали кобальта и заменой им такого же количества никеля (табл. 1). В ходе экспериментальных исследований было установлено повышение уровня прочностных характеристик стали в аустенитном состоянии в 1,5–2 раза по сравнению со сталью 12X18H10T.

Таблица 1

Химический состав опытных плавков стали типа 23X15H7M2, вес. %

Номер плавки	C	Cr	Ni	Co	Si	Mo	V
126	0,19	15,3	4,4	2,3	0,41	1,83	1,01
328	0,18	16,5	6,4	-	0,27	2,22	0,5
330	0,20	16,0	4,54	2,5	0,27	1,91	0,66
333	0,24	15,04	6,48	-	0,33	1,78	0,62

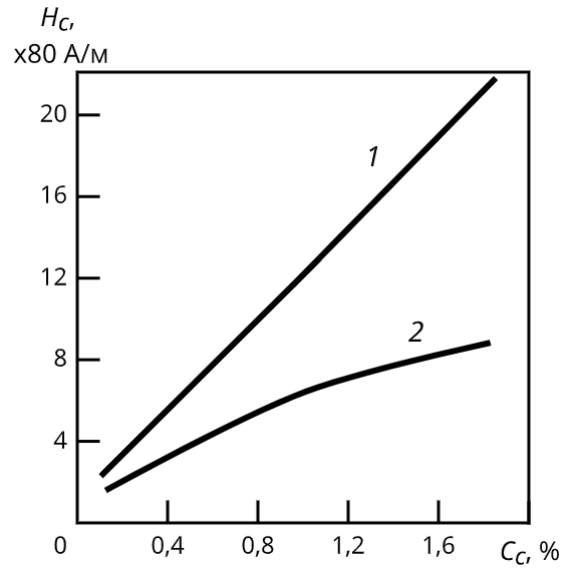
Все плавки содержали марганца (0,39 – 0,57)%, серы и фосфора менее 0,025%. Плавки 330,333, 339 и 340 были выплавлены в индукционной печи ИСТ-0,16. Плавка 126 выплавлена в дуговой основной электропечи ДСП-1,5. Плавки 330,333, 339 и 340 выплавлялись без раскисления стали (метод переплава), плавка 126 – с раскислением стали, что обеспечивает более высокую степень её чистоты по неметаллическим включениям. Известно, что существенное влияние на магнито-мягкие свойства стали оказывает наличие в её структуре оксидов, нитридов и частиц других соединений.

Например, с увеличением объёмной доли частиц цементита происходит повышение значений коэрцитивной силы (рис.1), причем вид этой зависимости определяется формой частиц цементита. Для пластинчатых частиц цементита зависимость имеет линейный вид, а для близких по форме к сферическим –  $\alpha^{2/3}$ , где  $\alpha$  – объёмная доля частиц цементита [5].

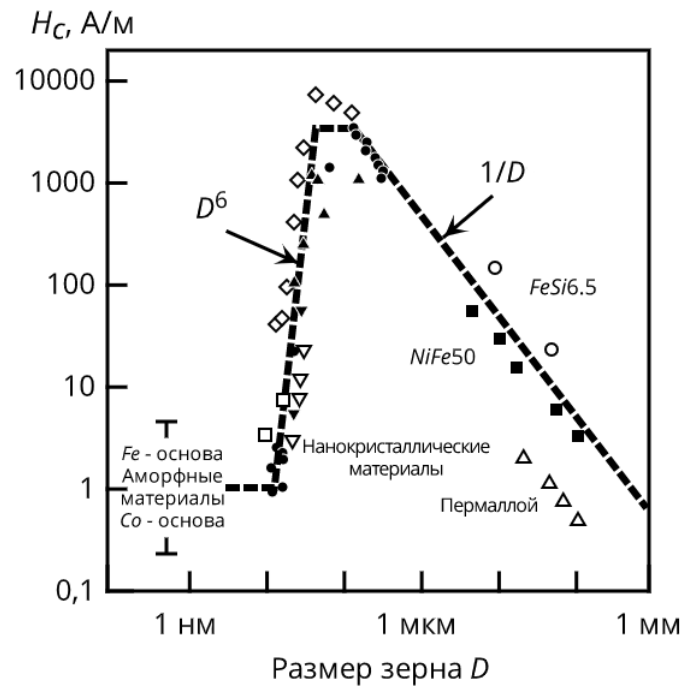
На величину коэрцитивной силы существенно влияет уровень внутренних упругих напряжений. Согласно дислокационной теории коэрцитивной силы  $H_c \sim \sqrt{\rho}$ , где  $\rho$  – плотность дислокаций, при этом значение коэрцитивной силы зависит от размера зерна (рис.2) [6].

Для повышения уровня магнито-мягких характеристик стали необходимо увеличить магнитную индукцию  $B_s$  в полях 50 и 100 эрстед до значений  $B_{50} \geq 5000$  гс;  $B_{100} \geq 8000$  гс, а также снизить величину коэрцитивной силы в этих же полях до  $H_c \leq 20$  эрс. С этой целью целесообразно легировать сталь элементами (Co, Gd), имеющими более высокий магнитный момент атома, чем железо [7,8] (табл. 2).

Известно, что легирование стали кобальтом способствует увеличению намагниченности насыщения [5], а это позволяет повысить величину магнитной индукции стали в полях 50 и 100 эрстед.



**Рис.1.** Зависимость коэрцитивной силы от содержания углерода в стали (1 – пластинчатый цементит; 2 – зернистый цементит;) [5].



**Рис.2.** Зависимость коэрцитивной силы ( $H_c$ ) от размера зерна ( $D$ ) для различных видов магнито-мягких материалов [6].

Таблица 2

Значения атомных магнитных моментов ферромагнитных металлов.

Элемент	Магнитный момент атома (N <sub>B</sub> )
Железо	2,22
Кобальт	1,72
Никель	0,60
Гадолиний	7,12

Для получения максимального количества мартенсита и соответственно увеличения значений магнитной индукции стали были опробованы два режима термической обработки: 1 режим – предварительная обработка 800°C, 3 часа, вода; - закалка 1070°C, 3 часа, вода; термоциклическая обработка 800°C, 5 циклов по 1 часу, вода; отпуск 400°C, 10 часов, воздух; 2 режим – предварительная обработка 800°C, 3 часа, вода; закалка 1070°C, 3 часа, вода; термоциклическая обработка 800°C, 5 циклов по 0,5; 1; 2; 3; 4 часа, вода; промежуточная закалка 900°C, 3 часа, вода; промежуточное старение 750°C, 10 часов, вода; отпуск 400°C, 10 часов, воздух.

Определение магнитных характеристик выполнялось на автоматизированном измерительном комплексе, разработанном в Институте прецизионных сплавов ЦНИИЧМ им. И.П.Бардина. Измерения выполнялись на образцах цилиндрической формы, причем погрешность измерения составляла  $\pm 2\%$ . На комплексе выполнялись также измерения на образцах тороидальной формы с погрешностью  $\pm 15\%$ . Значения магнитной индукции и коэрцитивной силы определяли в полях 50, 100, 375 и 625 эрс, при этом измерения проводили на трех образцах при каждом значении поля. Следует отметить, что 1 тл =  $10^4$  гс, 1 А/м =  $4\pi \times 10^{-3}$  эрс, 1 эрс = 79,6 А/м.

Средние значения полученных величин приведены в таблице 3.

Таблица 3

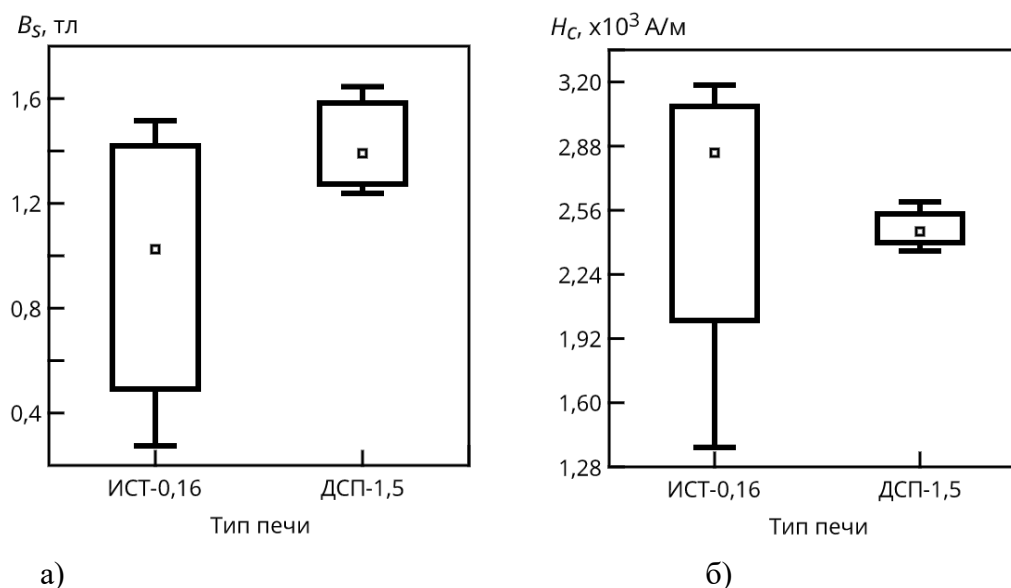
Магнитные характеристики мартенсита отпуска опытных плавок стали типа 23X15H7M2.

№ плавки	Магнитные свойства (образцы тороидальной формы)							
	Термообработка по режиму 1				Термообработка по режиму 2			
	B <sub>50</sub> , гс	H <sub>c50</sub> , э	B <sub>100</sub> , гс	H <sub>c100</sub> , э	B <sub>50</sub> , гс	H <sub>c50</sub> , э	B <sub>100</sub> , гс	H <sub>c100</sub> , э
328	2352	26,2	5259	37	-	-	-	-
330	2835	17,5	7101	32,8	-	-	-	-
333	3890	24,2	7951	30,8	4185	19,2	8708	26
	Магнитные свойства (образцы цилиндрической формы)							
	Термообработка по режиму 1				Термообработка по режиму 2			
	B <sub>50</sub> , гс	H <sub>c50</sub> , э	B <sub>100</sub> , гс	H <sub>c100</sub> , э	B <sub>50</sub> , гс	H <sub>c50</sub> , э	B <sub>100</sub> , гс	H <sub>c100</sub> , э
126	12400	28	12498	28,8	12590	29,9	12642	29,5

Полученные данные были обработаны с помощью программы «Statistica» v.7. Для оценки влияния способа выплавки, режима термообработки и ввода кобальта на уровень магнитомягких характеристик были построены диаграммы размаха (так называемые «ящички-усы»).

Они показывают вариацию значений и дают возможность визуализировать, а также быстро оценить силу зависимости между группирующей и зависимой переменными [9].

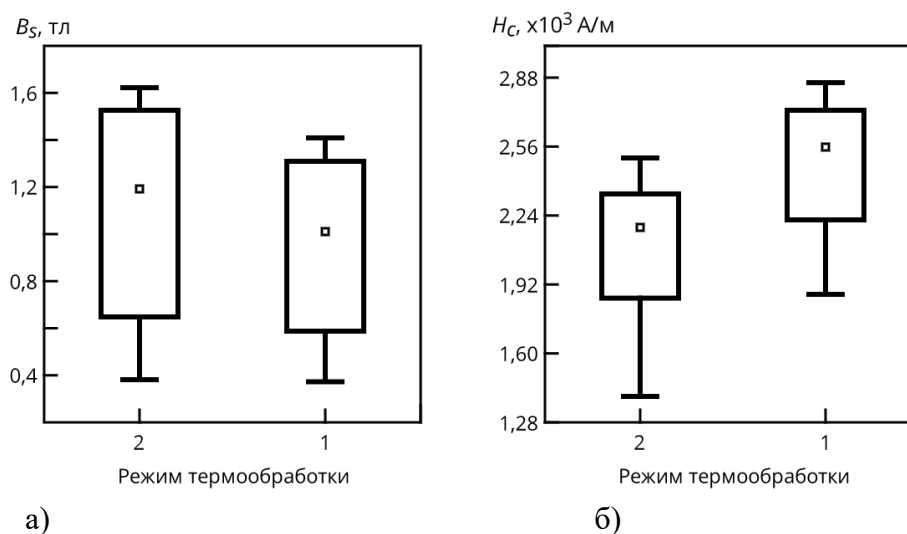
Влияние способа выплавки на значения магнитной индукции ( $B_s$ ) и коэрцитивной силы ( $H_c$ ) для плавок 126 и 330 приведено на рис.3 (а,б).



**Рис.3.** Диаграммы размаха по влиянию способа выплавки (ИСТ-0,16, пл.330; ДСП-1,5, пл.126) на величину магнитной индукции (а) и коэрцитивной силы (б).

Очевидно, что раскисление стали, выполненное при плавке стали в печи ДСП-1,5 обеспечивает более низкое содержание неметаллических включений в стали по сравнению с выплавкой в печи ИСТ-0,16. Это вызывает повышение уровня магнитомягких характеристик стали, так магнитная индукция растет на  $\sim 20$ -40%, а коэрцитивная сила снижается на 10-15%.

На рис.4 показаны диаграммы размаха по влиянию режима термообработки (1 и 2) на величину магнитной индукции и коэрцитивной силы.

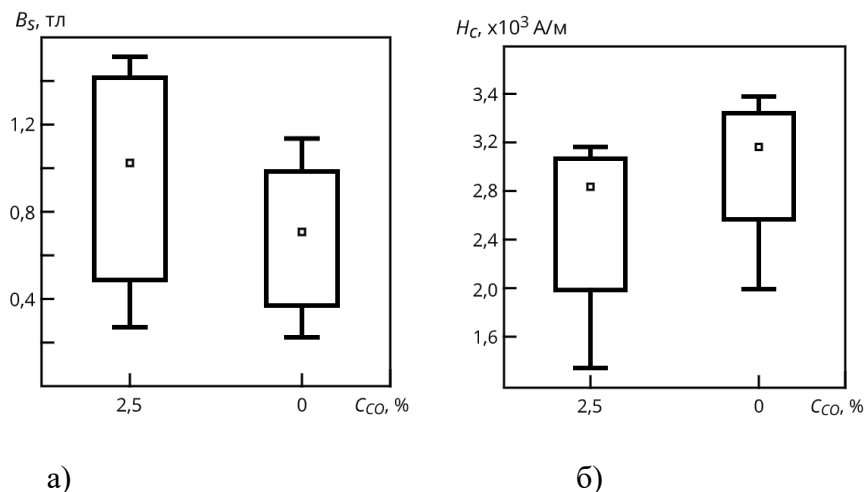


**Рис.4.** Диаграммы размаха по влиянию режима термообработки на величину магнитной индукции ( $B_s$ , а) и коэрцитивной силы ( $H_c$ , б) (пл.333).

Как видно из диаграмм размаха, термообработка по режиму 2 обеспечивает повышение магнитной индукции (на ~ 15%) и снижение коэрцитивной силы (на ~ 12%), что объясняется более высоким содержанием мартенсита образующимся в стали после термообработки по режиму 2 по сравнению с режимом 1 [3].

На рис.5 показаны диаграммы размаха по влиянию кобальта на величину магнитной индукции и коэрцитивной силы.

Очевидно, что замена в стали 2-3% никеля на такое же содержание кобальта приводит к повышению магнитной индукции на ~20-30% и снижению коэрцитивной силы на ~10-12%, что способствует повышению уровня магнитомягких характеристик.



**Рис.5.** Диаграммы размаха по влиянию содержания кобальта на величину магнитной индукции (B<sub>s</sub>, а) и коэрцитивной силы (H<sub>c</sub>, б) (пл.328- без Co, пл.330- 2,5% Co).

Проведенный статистический анализ результатов экспериментальных исследований позволил установить:

1. Пониженное содержание неметаллических включений в стали при её выплавке в печи ДСП-1,5, по сравнению с выплавкой в печи ИСТ-0,16, способствует увеличению магнитомягких характеристик.
2. Термообработка по режиму 2 обеспечивает повышение магнитной индукции (на ~ 15%) и снижение коэрцитивной силы (на ~ 12%),
3. Введение в состав стали кобальта (2,0-2,5%) вызывает повышение магнитной индукции на ~20-30% и снижение коэрцитивной силы на ~10-12%.

### Список литературы

1. Левин Ф.Л., Ульянин Е.А., Дмитриев В.А. Немагнитная сталь с магнитными зонами в заданных участках заготовки // Высокопрочные немагнитные стали / отв. ред. О.А.Баннх. - М.: Наука, 1978. - С.205-208.
2. Глебов В.В., Блинов В.М., Репин Ф.Ф. Применение стали 23X15H7M2 для изготовления ответственных деталей судового машиностроения / Современные технологии в машиностроении. XIV Международная научно-практическая конференция. Сб. статей. – Пенза: 2010. - С.6-7.

3. Глебов В.В., Репин Ф.Ф., Ефремов С.Ю. Влияние легирования на механические и коррозионные характеристики стали 23X15H7M2 / Труды конгресса международного форума «Великие Реки». - 2014. - Вып.3. - С.53-57.
4. Глебов В.В., Репин Ф.Ф. Влияние легирования и термообработки на физико-механические характеристики стали типа 23X15H7M2 / Труды конгресса международного форума «Великие Реки». - 2016. - Вып.5. - С.1-4.
5. Кекало И.Б., Самарин Б.А. Физическое металловедение прецизионных сплавов. Сплавы с особыми магнитными свойствами. - М.: Металлургия, 1989. - 496 с.
6. Buschow K.H.J., de Boer F.R. Physics of magnetism and magnetic materials. - Kluwer , N.Y.: 2004. - 191 p..
7. Глебов В.В., Каленихин Ю.Н., Голова И.Ю., Левин Ф.Л., Назаров А.А., Иванов Г.А. Коррозионно-стойкая магнитомягкая сталь // А.С. СССР. №1560613, 1988.
8. Вонсовский С.В., Изюмов Ю.А. Электронная теория переходных металлов, ч.1 // Успехи физических наук. - 1962. - Т.57, № 3. - С.377-448.
9. Боровиков В.П. Statistica. Искусство анализа данных на компьютере. - СПб: 2003. - 688 с.

*Дата поступления: 20 января 2020 г.*