



УДК 621.787.4

**В.В. Глебов**, к.ф.-м.н., доцент ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

**Ф.Ф. Репин**, д.т.н., профессор ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

**М.А. Глебова**, к.т.н. ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, д.5

### ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ И ЛЕГИРОВАНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ ТИПА 23X15H7M2

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

*С помощью программы «Statistica» выполнен анализ влияния способа выплавки, термообработки и легирования на магнито-мягкие свойства мартенсита отпуска стали типа 23X15H7M2.*

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 СУЗ реактора АЭС. Однако, как показали проведенные исследования, 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].

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

Поэтому были выплавлены опытные плавки с введением в состав стали кобальта, гадолиния и других легирующих элементов (табл. 1), что обеспечило повышение уровня прочностных характеристик стали в аустенитном состоянии в 1,5–2 раза выше, чем у стали 12X18H10T.

Таблица 1

#### Химический состав опытных плавки стали типа 23X15H7M2, вес.%

Номер плавки	C	Cr	Ni	Co	Si	Mo	V	Gd
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	0,16

Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов

Секция V Технология конструкционных материалов, машиноремонта и водоподготовка

Все плавки содержат 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 была 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.

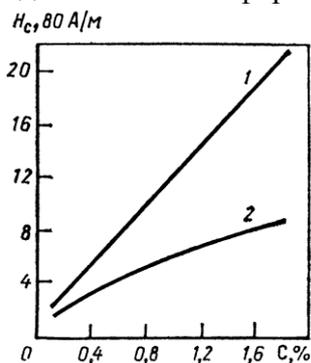


Рис.1. Зависимость коэрцитивной силы от содержания углерода в стали (1 – пластинчатый цементит; 2 – зернистый цементит;) [5].

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

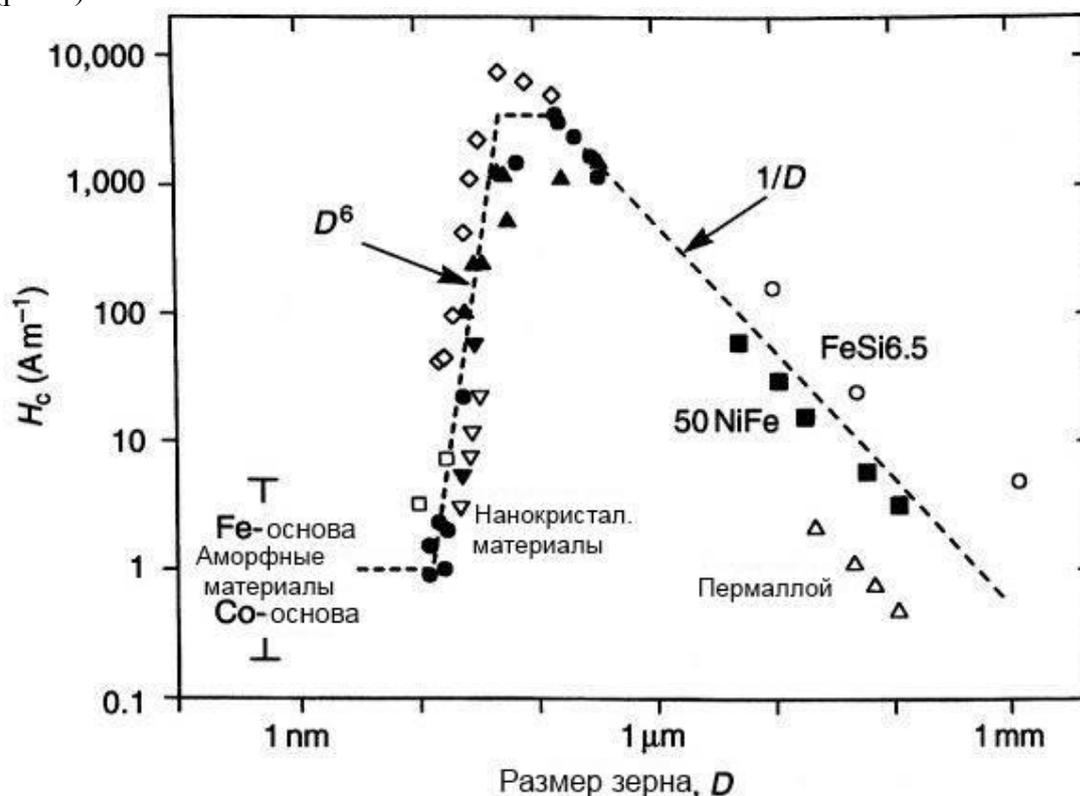


Рис.2. Зависимость коэрцитивной силы ( $H_c$ ) от размера зерна ( $D$ ) для различных видов магнито-мягких материалов [6]

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] (табл. 2).

Таблица 2

**Значения атомных магнитных моментов ферромагнитных металлов**

Элемент	Магнитный момент атома ( $N_B$ )
Железо	2,22
Кобальт	1,72
Никель	0,60
Гадолиний	7,12

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

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 ИПС 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, однако погрешность при этом составила  $\pm 15\%$ . 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. Поэтому для каждой плавки была получена совокупность 12 экспериментальных данных.

Средние значения полученных величин приведены в таблице 3.

Таблица 3

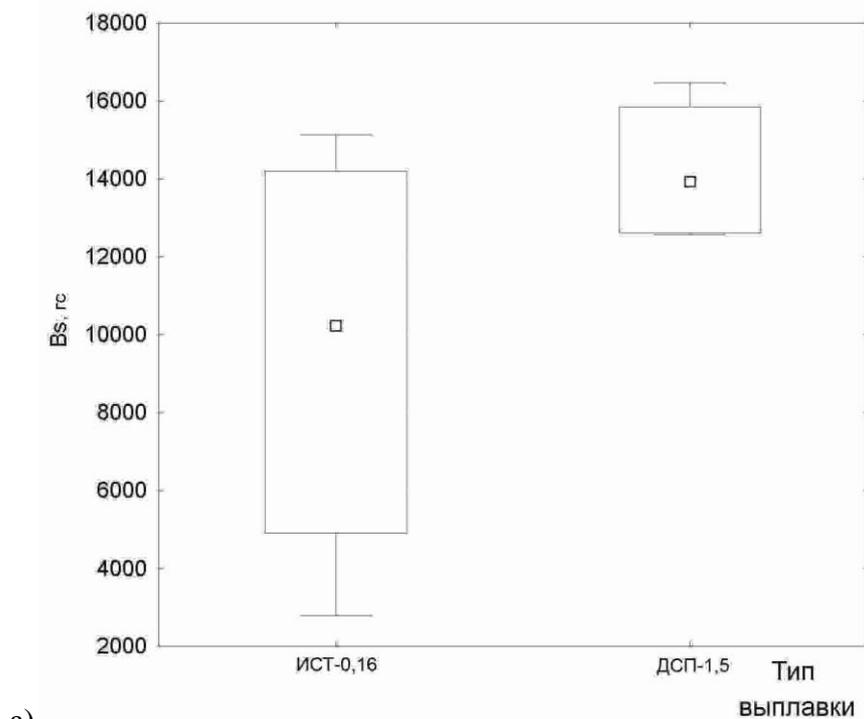
**Магнитные характеристики мартенсита отпуска опытных плавок стали типа 23X15H7M2**

№ плавки	Магнитные свойства (образцы тороидальной формы)							
	Термообработка по режиму 1				Термообработка по режиму 2			
	$B_{50}$ , гс	$H_{c50}$ , э	$B_{100}$ , гс	$H_{c100}$ , э	$B_{50}$ , гс	$H_{c50}$ , э	$B_{100}$ , гс	$H_{c100}$ , 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			
	$B_{50}$ , гс	$H_{c50}$ , э	$B_{100}$ , гс	$H_{c100}$ , э	$B_{50}$ , гс	$H_{c50}$ , э	$B_{100}$ , гс	$H_{c100}$ , э
126	12400	28	12498	28,8	12590	29,9	12642	29,5

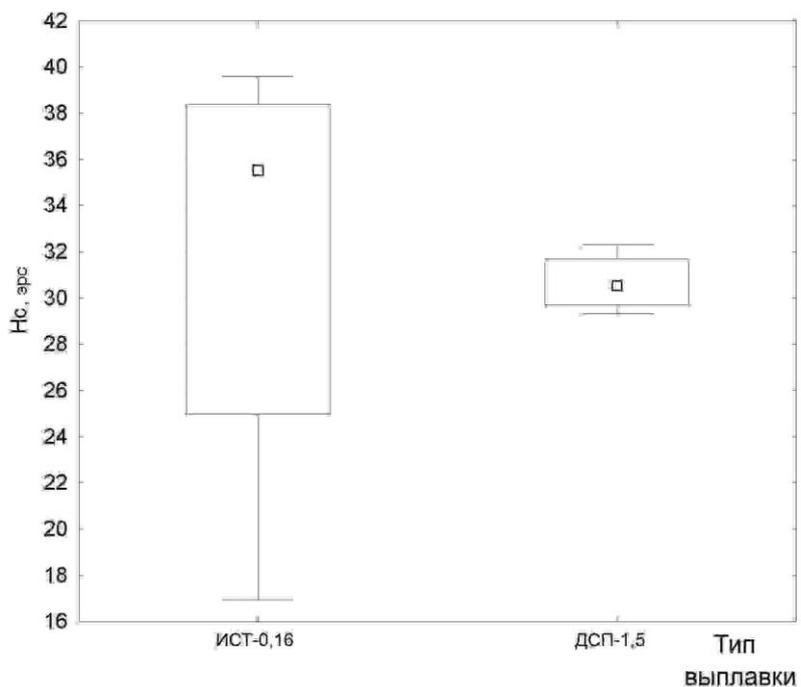
Полученные данные были обработаны с помощью программы «Statistica» v.7. Для оценки влияния способа выплавки, режима термообработки и ввода кобальта на уровень магнитомягких характеристик были построены диаграммы размаха (так называемые ящички-усы).

Они показывают вариацию значений и дают возможность визуализировать, а также быстро оценить силу зависимости между группирующей и зависимой переменными [8]. На диаграмме в центре ящика отмечена медиана, границы ящика соответствуют значению стандартной ошибки, а усы минимальному и максимальному значению измеренной величины.

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).



а)

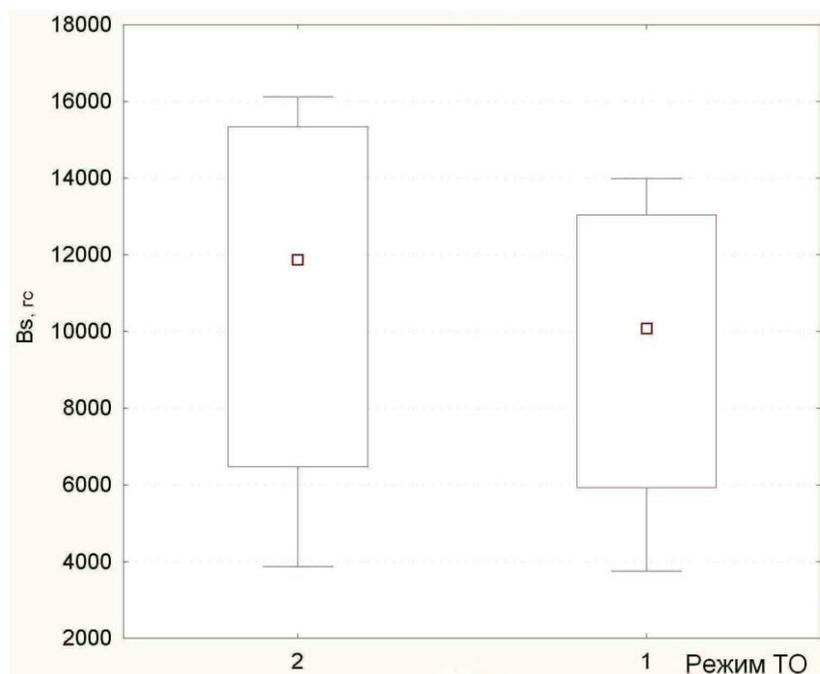


б)

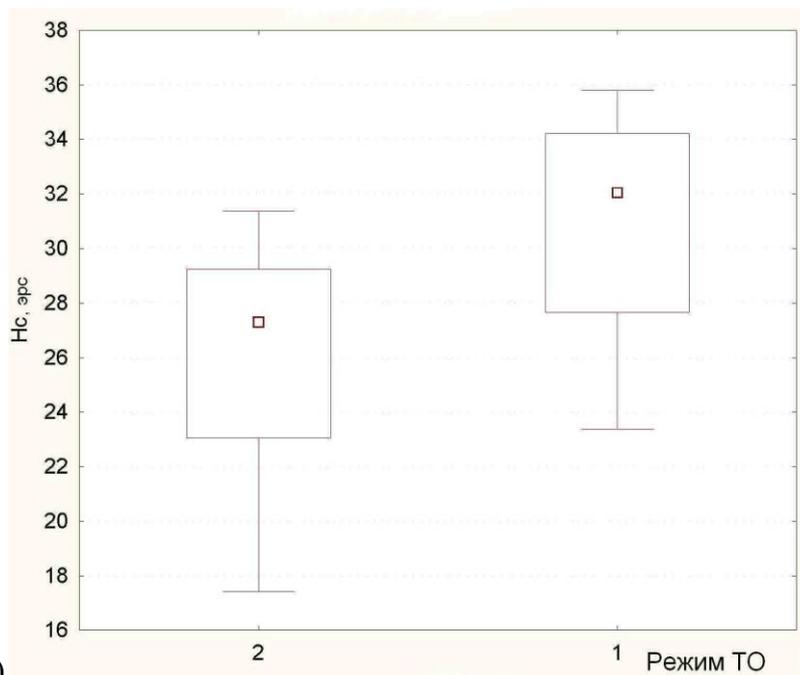
Рис.3. Диаграммы размаха по влиянию способа выплавки (ИСТ-0,16, пл.330; ДСП-1,5, пл.126) на величину магнитной индукции (а) и коэрцитивной силы (б).

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 ~ 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.



а)



б)

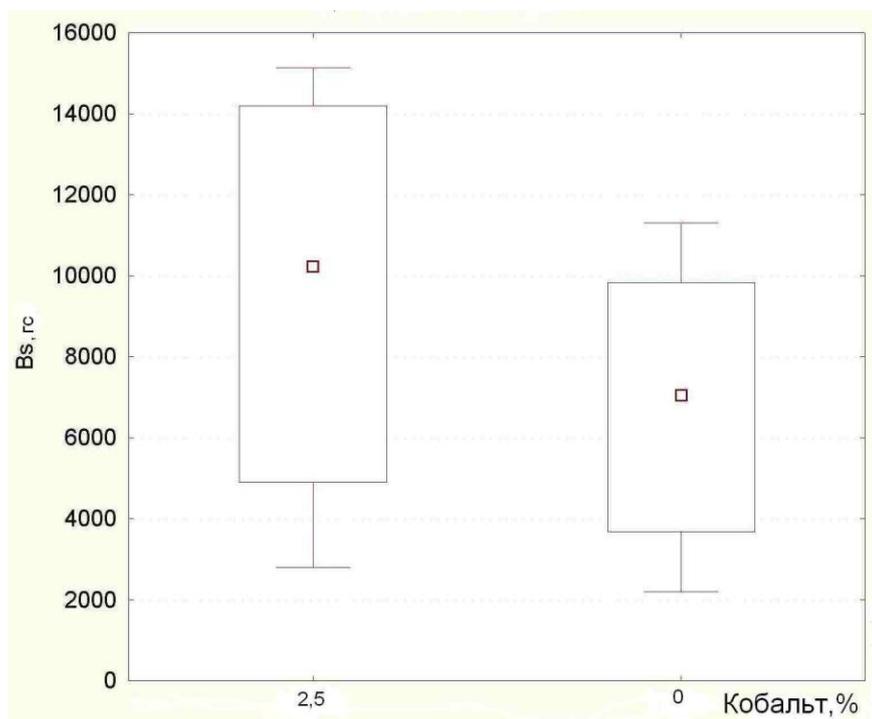
Рис.4. Диаграммы размаха по влиянию режима термообработки на величину магнитной индукции ( $B_s$ , а) и коэрцитивной силы ( $H_c$ , б) (пл.333).

Как видно из диаграмм размаха, термообработка по режиму 2 обеспечивает повышение магнитной индукции (на ~ 15%) и снижение коэрцитивной силы (на ~ 12%),

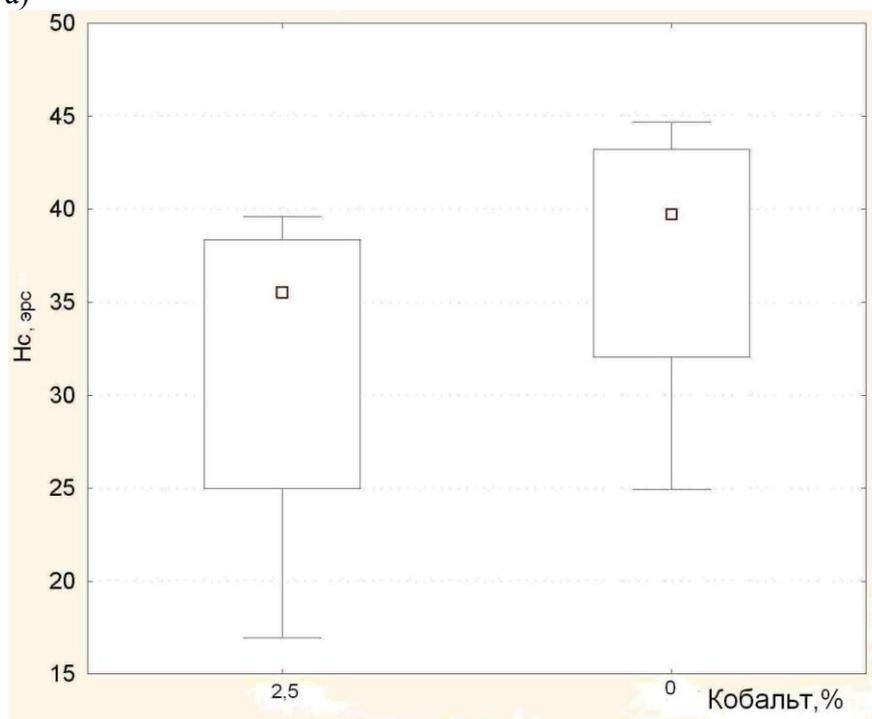
что объясняется более высоким содержанием мартенсита, образующимся в стали после термообработки по режиму 2 по сравнению с режимом 1 [ссылка на 95%].

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 содержание кобальта приводит к повышению магнитной индукции на ~20-30% и снижению коэрцитивной силы на ~10-12%, что способствует повышению уровня магнитомягких характеристик.



а)



б)

Рис.5. Диаграммы размаха по влиянию содержания кобальта на величину магнитной индукции ( $B_s$ , а) и коэрцитивной силы ( $H_c$ , б) (пл.328- без Со, пл.330- 2,5% Со).

Таким образом, проведенный статистический анализ экспериментальных данных позволил сделать следующие выводы:

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 магнито-мягких 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», - В кн. «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», вып.3, 2014, 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]. К.Н.Ж. Buschow, F.R. de Boer «Physics of magnetism and magnetic materials», Kluwer , N.Y., 2004, 191 p..
- [7]. Вонсовский С.В., Изюмов Ю.А. «Электронная теория переходных металлов, ч.1», УФН, т.57, вып.3, 1962, с.377-448.
- [8]. Боровиков В.П. «Statistica. Искусство анализа данных на компьютере», СПб, Питер, 2003, 688 с..

### **INFLUENCE OF HEAT TREATMENT AND ALLOYING ON PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL OF THE TYPE 23X15H7M2**

Glebov V.V., Ph. D ., Assoc .Prof. , FSFEI HE"VSUWT"  
Repin F.F., Ph. D ., Prof . , FSFEI HE"VSUWT"  
Glebova M.A., Ph. D . , FSFEI HE"VSUWT"

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

*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.*