

*Сорокин А.М.*

*Главный технолог АО НПО “Магнетон”*

*Россия, г. Владимир,*

*Кутенов А.В.*

*Главный специалист АО НПО “Магнетон”*

*Россия, г. Владимир*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ Т111-30Р ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА И СТЕПЕНИ ОБЖАТИЯ ПРИ ХОЛОДНОМ ПРОКАТЕ**

***Аннотация:** В настоящей статье приведены результаты исследований влияния температуры отжига и степени обжатия в процессе холодного проката стали Т90-27Р на ее магнитные характеристики (намагниченность насыщения  $M_s$  и удельные потери  $P$  в магнитном поле  $I$  Тл). Установлено, что индукция насыщения  $M_s$  увеличивается с ростом степени обжатия при холодной прокатке и температуры отжига. При этом при температурах отжига 650 - 700°C наблюдается снижение удельных магнитных потерь  $P$  для всех рассмотренных степеней сжатия, то отжиг при температуре 725°C и выше приводит к их росту.*

***Ключевые слова:** Кремнистая сталь, степень обжатия при холодном прокате, температура отжига, магнитные характеристики.*

***Annotation:** This article presents the results of studies of the influence and temperature of annealing and the degree of reduction in the process of cold rolling of steel Т90-27R on its magnetic characteristics (saturation magnetization  $M_s$  and specific losses  $P$  in a magnetic field of  $I$  T). It has been established that the saturation induction  $M_s$  increases with an increase in the degree of reduction during cold rolling and the annealing temperature. At the same time, at annealing*

*temperatures of 650 - 700°C, a decrease in specific magnetic losses  $P$  for all considered compression ratios is observed, then annealing at a temperature of 725°C and higher leads to their growth.*

**Key words:** *Silicon steel, cold rolling reduction, annealing temperature, magnetic properties.*

В настоящее время стали на основе железа, легированного кремнием (до 1 масс. %), широко используются в электротехнике в качестве магнитомягких материалов для изготовления магнитопроводов трансформаторов, дросселей, слаботочных реле и т.д. [1]. Кроме того, в последние годы появились работы, показавшие перспективность данных материалов при создании магнитопроводов магниторезонансных томографов (МРТ) [2, 3].

При этом непосредственное использование данных материалов, выпускаемых в виде тонкого (0,2 – 0,35 мм) листового анизотропного проката [4] неэффективно по трем причинам. Во-первых, сборка магнитопроводов МРТ (толщиной до 200 мм [1]) из таких тонких листов приводит к высокой трудоемкости данной операции. Во-вторых, неизбежное наличие между листами немагнитных зазоров вызывает большие потери магнитного поля в магнитопроводе. В-третьих, тонкие листы стали, полученные при высоких степенях обжата (более 99%), содержащие большое количество внутрикристаллических дефектов, необходимых для снижения потерь в высокочастотных переменных электромагнитных полях, изначально имеют высокие удельные магнитные потери в постоянном магнитном поле (0,9-1,8 Вт/кг [5]), в то время как рекомендуемое значение данной характеристики не должно превышать 0,5 Вт/кг [3].

Однако, как было теоретически показано в работах [3, 6], все эти три недостатка кремнистых анизотропных сталей могут быть устранены снижением степени обжата в процессе их холодного проката.

В настоящей статье приведены результаты исследований влияния и температуры отжига и степени обжатия в процессе холодного проката стали Т90-27Р на ее магнитные характеристики. Данная сталь, согласно [4] имеет наименьшее значение удельных магнитных потерь  $P$  (не более 0,9 Вт/кг) в постоянном магнитном поле 1Тл при наивысшем значении намагниченности насыщения ( $M_s$  не менее 1, 88 Тл).

В качестве исходных материалов для выплавки слитков стали Т90-27Р с содержанием кремния 0,5 масс. % и углерода менее 0,01 масс. %, использовали железо карбонильное ОСЧ-6 и кремний марки Кр0. Кремний вводился в виде силицида железа  $Fe_2Si$ , который получали предварительной вакуумной плавкой кремния марки Кр0 и карбонильного железа. Выплавку слитков стали проводили в печи ИСВ-0,04. Разливку слитков проводили в стальную изложницу. Размер слитков составлял 120 x 80 x 100 мм. Выплавленные слитки, гомогенизировали при температуре 1350°C в течение 24 часов в вакуумной печи СНВЭ-1.3.1. В процессе гомогенизации глубина вакуума в рабочей камере печи составляла не менее 0,1 Па.

Холодную прокатку слитков проводили на лабораторном комбинированном прокатном стане К220-75/300 (Д240/300) фирмы «DIMA Maschinen GmbH» при степенях обжатия 50, 55, 60, 65, 70 и 75%. При этом минимальная степень обжатия (50%), обеспечивающая формирование анизотропной структуры проката, была установлена в соответствии с рекомендациями [5].

Для определения магнитных характеристик из полученного проката на станке 32GZ-AS методом проволоочной электроэрозионной порезки были вырезаны образцы прямоугольной формы с размерами  $20 \pm 0,1$  x  $20 \pm 0,1$  мм с сохранением толщины заготовок.

Перед определением магнитных характеристик (намагниченности насыщения  $M_s$  и удельных потерь  $P$  в магнитном поле 1 Тл) все образцы проходили отжиг в вакуумной печи СНВЭ-1.3.1 в течение 2 часов. Глубина

вакуума в рабочей камере в процессе отжига составляла не менее 0,1 Па. Температура отжига после каждого определения магнитных характеристик увеличивалась и последовательно составляла 650, 675, 700 и 725°C. Определение намагниченности насыщения ( $M_s$ ) проводилось на гистерезисграфе “Permagraph C-300” в комплекте с пермеаметром EP-2 и программным обеспечением “Perma+”. Определение удельных потерь в магнитном поле 1 Тл ( $P$ ) проводилось на магнитоизмерительной установке МК-3Э с соленоидом СД-3 и программным обеспечением SGL04. Результаты исследования магнитных характеристик (усредненные по трем образцам) приведены на рисунках 1 и 2.

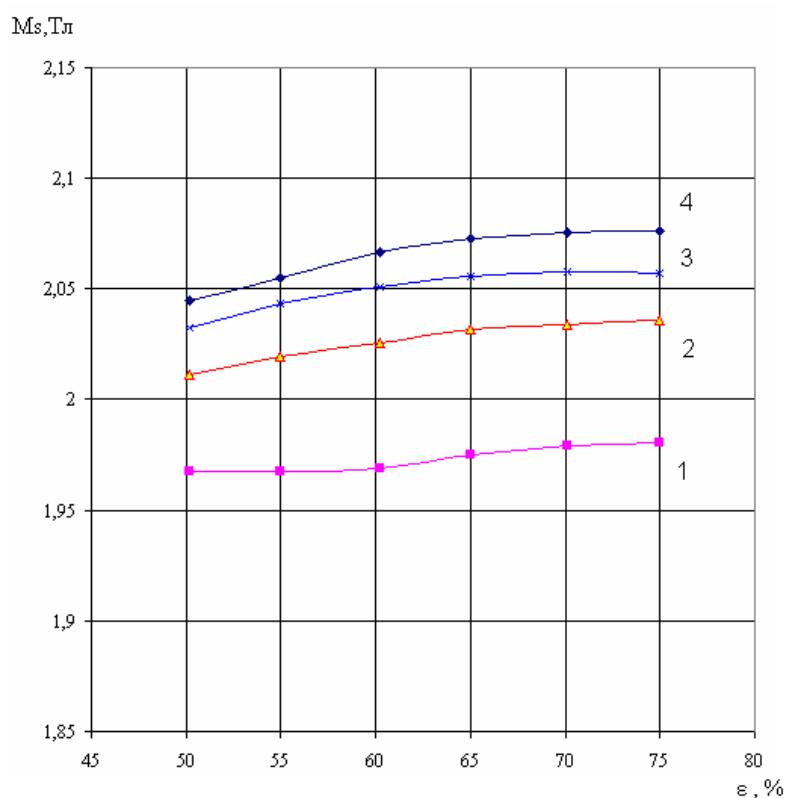


Рисунок 1. Зависимость намагниченности насыщения  $M_s$  образцов от степени обжатия при холодной прокатке  $\epsilon$  и температуры отжига  $T$ :

1 –  $T = 650^\circ\text{C}$ ; 2 –  $T = 675^\circ\text{C}$ ; 3 –  $T = 700^\circ\text{C}$ ; 4 –  $T = 725^\circ\text{C}$

Как видно из рисунка 1, индукция насыщения образцов  $M_s$  незначительно, но (на 3-5%) увеличивается с ростом степени обжатия при холодной прокатке. При этом отжиг образцов при любой температуре в диапазоне от  $650^{\circ}\text{C}$  до  $725^{\circ}\text{C}$  в течение 2 часов благоприятно влияет на величину  $M_s$  и чем выше температура отжига, тем заметнее это влияние.

Однако рассмотрение зависимостей рисунка 2 показывает, что влияние температуры отжига на удельные магнитные потери образцов носит более сложный характер. Если при температурах отжига  $650 - 700^{\circ}\text{C}$  наблюдается снижение удельных магнитных потерь для всех рассмотренных степеней сжатия, то отжиг при температуре выше  $725^{\circ}\text{C}$  приводит к их росту.

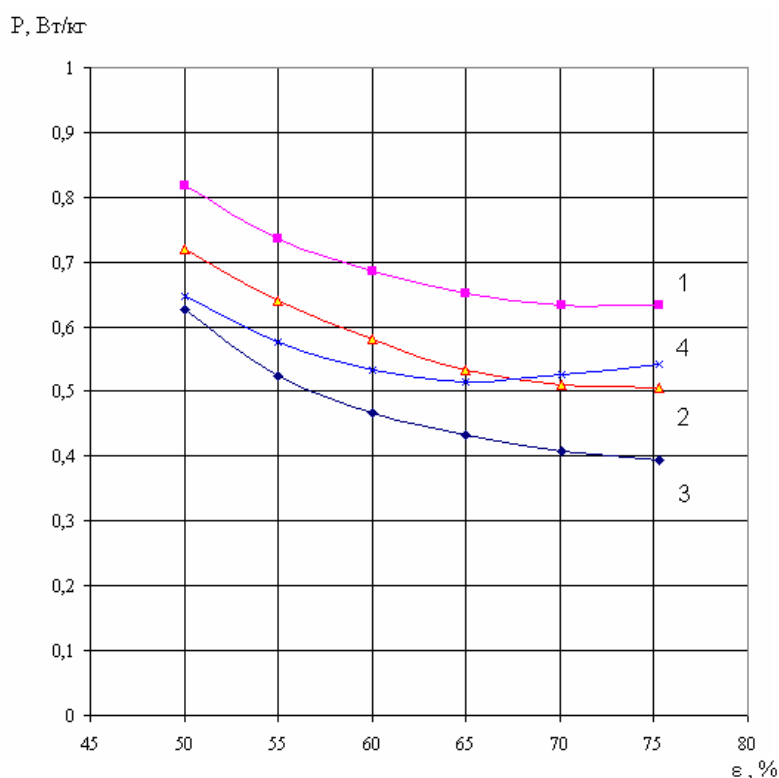


Рисунок 2. Зависимость удельных потерь образцов  $P$  от степени сжатия при холодной прокатке  $\varepsilon$  и температуры отжига  $T$ :

1 –  $T = 650^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $T = 675^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $T = 700^{\circ}\text{C}$ ; 4 –  $T = 725^{\circ}\text{C}$

Особенно это заметно на образцах, полученных при степенях сжатия более 65%. Такое влияние высокой температуры отжига, согласно [6], объясняется параллельным протеканием двух процессов в магнитном

материале при отжиге: ростом числа термических дислокаций и релаксацией внутренних деформаций, возникших после его механической обработки в процессе изготовления образцов.

При этом, если намагниченность насыщения, которая не относится к структурно чувствительным магнитным характеристикам, практически не реагирует на первый процесс, то величина удельных потерь  $P$  напрямую зависит от концентрации дислокаций в стали.

По всей видимости, при повышении температуры отжига до  $725^{\circ}\text{C}$  отрицательный эффект от роста числа дислокаций начинает превалировать над положительным воздействием снижения внутренних напряжений и удельные магнитные потери  $P$  начинают расти. При этом данный эффект более заметен для образцов, которые были изготовлены при более высоких степенях обжата и изначально имели большую концентрацию дислокаций.

Анализ рисунков 1 и 2 показывает, что требуемые по [1, 3] удельные потери в магнитном поле 1 Тл менее  $0,5$  Вт/кг достигаются на образцах стали Т90-27Р при степени его обжата при прокате около 70%. При этом достигнутая величина намагниченности насыщения выше почти на 11% по сравнению со значениями, приведенными в [2].

С учетом того, что после проката образцы стали Т90-27Р имели приемлемую для механической обработки толщину 30 мм, то данный материал может быть эффективно использован при изготовлении магнитопроводов МРТ.

Работа выполнена в рамках Соглашения между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и АО НПО «Магнетон» (г. Владимир, Россия) №02.G25.31.0137 от 01.12.2015 г., реализуемого при финансовой поддержке по постановлению Правительства РФ № 218 от 09.04.2010 г.

### Список литературы:

1. Исмагилов, Ф.Р. Электромеханические системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами/ Ф.Р. Исмагилов, А.А. Герасин, И.Х. Хайруллин, В.Е.Вавилов. – М.: Машиностроение, 2014. – 267 с.
2. Dragoshanskii, Y.N. Physical Mechanisms of Reverse Magnetization Jumps and Improvement of the Functional Characteristics of Ferromagnetics / Y. N Dragoshanskii, V.I. Pudov // Technical Physics.– 2018.– Vol. 63, №. 9.– P. 358–361.
3. Ryu, J.S 3-D Optimal Shape Design of Pole Piece in Permanent Magnet MRI Using Parameterized Nonlinear Design Sensitivity Analysis / J.S. Ryu, Y. Yap, C.S. Koh // IEEE Transactions on Magnetics.– 2006.– V. 42, №4.– P.1351–1354.
4. ГОСТ 32482–2013. Прокат тонколистовой холоднокатаный из электротехнической анизотропной стали. Технические условия.– М.: ФГУП Стандартиформ , 2013. – 15 с.
5. Казаджан, В.Д. Магнитные свойства электротехнических сталей и сплавов / В.Д. Казаджан, Л.Б. Дурнева.– М.: ООО «Наука и технологии», 2000. – 224 с.
6. Dragoshanskii Y.N., Formation of magnetic properties of electrical steel / Y.N. Dragoshanskii // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures, – 2020. – Iss. 1. – P. 57–72.