

Научная статья

УДК 537.6/.8

DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-1-56-66

Изучение изменения магнитной проницаемости нержавеющей стали при различных технологических процессах

Ксения Константиновна Рябченко¹, Алексей Юрьевич Пахомов²
Константин Владимирович Жилиев³, Александр Анатольевич Старостенко⁴
Александр Сергеевич Цыганов⁵

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

¹K.K.Ryabchenko@inp.nsk.su

²A.Yu.Pakhomov@inp.nsk.su

³K.V.Zhilyaev@inp.nsk.su

⁴A.A.Starostenko@inp.nsk.su

⁵A.S.Tsygunov@inp.nsk.su

Аннотация

В данной статье представлено изучение влияния внешних воздействий, таких как отжиг в печи, шлифовка, TIG- и электронно-лучевая сварки на магнитную проницаемость нержавеющей стали аустенитного класса. Подробно описан процесс измерения и определения магнитных свойств стали. Помимо этого показана необходимость проведения дополнительной обработки нержавеющей стали для изменения ее магнитных свойств.

Ключевые слова

калибровочный дипольный магнит, датчики ЯМР, магнитное поле, магнитная проницаемость, магнитная восприимчивость, нержавеющая сталь, TIG-сварка, электронно-лучевая сварка, отжиг, вакуумный отжиг

Для цитирования

Рябченко К. К., Пахомов А. Ю., Жилиев К. В., Старостенко А. А., Цыганов А. С. Изучение изменения магнитной проницаемости нержавеющей стали при различных технологических процессах // Сибирский физический журнал. 2025. Т. 20, № 1. С. 56–66. DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-1-56-66

Study of Changes in the Magnetic Permeability of Stainless Steel During Various Technological Processes

Ksenia K. Riabchenko¹, Alexey Yu. Pakhomov², Konstantin V. Zhilyaev³,
Alexander A. Starostenko⁴, Alexander S. Tsyganov⁵

Budker Institute of Nuclear Physics of SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

¹K.K.Ryabchenko@inp.nsk.su

²A.Yu.Pakhomov@inp.nsk.su

³K.V.Zhilyaev@inp.nsk.su

⁴A.A.Starostenko@inp.nsk.su

⁵A.S.Tsygunov@inp.nsk.su

Abstract

This article presents a study of the influence of external treatment such as: annealing in a furnace, grinding, argon and electron beam welding on the magnetic permeability of austenitic stainless steel. The process of measuring and deter-

© Рябченко К. К., Пахомов А. Ю., Жилиев К. В., Старостенко А. А., Цыганов А. С., 2025

mining the magnetic properties of steel is described in detail. In addition, the need for additional processing of stainless steel to change its magnetic properties was shown.

Keywords

calibration dipole magnet, NMR sensors, magnetic field, magnetic permeability, magnetic susceptibility, stainless steel, TIG welding, electron beam welding, annealing, vacuum annealing

For citation

Riabchenko K. K., Pakhomov A. Yu., Zhilyaev K. V., Starostenko A. A., Tsyganov A. S. Study of changes in the magnetic permeability of stainless steel during various technological processes. *Siberian Journal of Physics*, 2025, vol. 20, no. 1, p. 56–66. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-1-56-66

Введение

Вакуумные материалы являются неотъемлемой частью многих промышленных процессов и научных исследований. Они используются для создания и поддержания вакуума внутри различного рода устройств и систем, что позволяет достичь определенных целей, таких как очистка, оптическое покрытие, синтез наноматериалов и других процессов, требующих особых условий.

Нержавеющая сталь является одним из наиболее популярных материалов для использования в вакуумных системах. Одной из ее особенностей является устойчивость к коррозии. Благодаря содержанию хрома и никеля в составе образуется защитная пленка на поверхности материала, которая предотвращает контакт с воздухом и водой, что гарантирует долгую эксплуатацию и сохранение магнитной проницаемости стали.

Магнитная проницаемость – это свойство материала, определяющее его способность пропускать магнитные силовые линии. Нержавеющая сталь, благодаря особым химическим и структурным свойствам, обладает относительно низкой магнитной проницаемостью, это означает, что она слабо притягивается к магниту. Данное свойство делает ее идеальным материалом для приборов и устройств, где требуется минимальное взаимодействие с магнитными полями.

Однако в зависимости от состава существует несколько видов нержавеющей стали. Например, чистая аустенитная нержавеющая сталь (немагнитная) имеет низкую магнитную проницаемость и практически не притягивается к магниту, однако добавление хрома и никеля может повысить ее магнитную проницаемость. Также существует ферритная нержавеющая сталь (магнитная), которая может иметь достаточно высокую магнитную проницаемость и некоторую степень притяжения к магниту.

Содержание элементов в стали должно быть определенным образом сбалансировано, чтобы достигнуть желаемых магнитных свойств. Например, нержавеющая сталь с высоким содержанием хрома и низким содержанием никеля будет иметь высокую магнитную проницаемость, но при этом может потерять свою коррозионную стойкость.

Определенные химические элементы также могут влиять на немагнитные свойства стали. Например, добавление молибдена может снизить магнитную проницаемость стали и улучшить ее устойчивость к коррозии. Другие элементы, такие как марганец и кремний, также могут влиять на магнитные свойства стали в разной степени.

Важно отметить, что форма и обработка стали также могут влиять на ее магнитные свойства. Например, магнитная проницаемость может изменяться в зависимости от толщины стали или от наличия напряжений внутри материала. Также большое влияние на магнитную проницаемость оказывает термообработка.

При термообработке происходят изменения в микроструктуре нержавеющей стали, что приводит к изменению ее магнитных свойств. Во время нагрева и охлаждения происходят процессы фазовых превращений, реорганизации зерен и образования навесок. Это может привести как к увеличению, так и к снижению магнитной проницаемости.

В некоторых случаях термообработка может позволить достичь определенного значения магнитной проницаемости, которое требуется для конкретного прибора или устройства. Например, при нагреве нержавеющей стали и последующем охлаждении в определенном режиме можно получить материал с повышенной магнитной проницаемостью, что может быть полезно при создании электромагнитов или других устройств, где требуется высокая чувствительность к магнитному полю.

Однако необходимо учитывать, что при термообработке нержавеющей стали возможны и другие изменения, которые могут негативно сказаться на ее механических и химических свойствах. Поэтому при выборе режима термообработки необходимо внимательно оценивать все возможные влияющие факторы и подбирать оптимальный режим обработки.

Аустенитные нержавеющие стали марок AISI 321, AISI 316LN, AISI 316L, 12X18H10T широко используются при конструировании и изготовлении высоковакуумного оборудования из-за своих хороших механических, технологических и магнитных свойств, а также их хорошей свариваемости.

Стабильность аустенитной структуры стали, как уже было сказано, зависит от химического состава и внешних условий, температуры и деформации. Таким образом, необходимо проводить измерения магнитной проницаемости нержавеющей стали как в исходном состоянии, так и на разных этапах обработки. С влиянием низкотемпературной обработки на магнитные свойства некоторых образцов нержавеющей стали можно ознакомиться в статьях [1; 2].

1. Свойства изучаемых образцов

Химический состав исследуемых образцов нержавеющей стали определялся с помощью стилоскопа – прибора, предназначенного для визуального полуколичественного анализа сталей и цветных сплавов по их спектрам излучения. Принцип его действия основан на том, что образец контактирует с электродом стилоскопа, в результате чего образуется искра или дуга. Излучаемый свет проходит через оптическую систему и раскладывается на спектр. В окуляре наблюдаются спектральные линии в области спектра человеческого зрения. На основании методических указаний по выбору диапазона спектра, наличию и интенсивности спектральных линий определяется наличие химического элемента в сплаве и его доли.

В табл. 1 представлено процентное содержание химических элементов в исследуемых образцах нержавеющей стали.

Таблица 1

Химический состав нержавеющей стали

Table 1

Chemical composition of stainless steel

	Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al
316L	67,7	0,03	0,3	1,19	17,7	1,97	10,6	0,003
321	69,8	0,04	0,4	1,13	17,7	0,28	9,4	0,135
316LN	65,4	0,02	0,3	1,12	16,8	2,4	13,3	0,010
12X18H10T	70,8	0,02	0,3	1,03	17,3	0,04	9,8	0,049
	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	
316L	0,19	0,04	0,005	0,0062	0,094	0,05	0,015	
321	0,15	0,39	0,012	0,31	0,107	0,09	0,015	
316LN	0,14	0,46	0,012	0,0078	0,060	0,05	0,015	
12X18H10T	0,02	0,09	0,019	0,309	0,112	0,05	0,015	

2. Методика измерений и вычислений

Измерения проводились в калибровочном дипольном магните (КДМ) [3], высота межполюсного зазора которого составляет 60 мм. На катушки КДМ подавался ток от источника питания в диапазоне от 40 до 1000 А, что соответствует магнитному полю от 2 до 27 кГс.

Измерения магнитного поля проводились при помощи датчиков ядерного магнитного резонанса [4]. На каждом диапазоне полей проводилось по 10 измерений, далее бралось среднее значение поля.

Если поместить исследуемый образец нержавеющей стали в магнитное поле, то содержащиеся в нем магнитные диполи переориентируются в направлении магнитного поля, что приведет к изменению индукции магнитного поля, а именно к ее увеличению.

Связь индукции и напряженности магнитного поля выражается следующим образом:

$$B = \mu\mu_0 H, \quad (1)$$

где B – магнитная индукция (Тл), μ – относительная магнитная проницаемость среды, μ_0 – магнитная постоянная (Гн/м), H – напряженность магнитного поля (А/м).

Воспользуемся законом полного тока для магнитного поля:

$$\oint_L H \cdot dl = I_{\text{общ}}, \quad (2)$$

где L – длина произвольного замкнутого контура (м).

Решая это уравнение для двух ситуаций: когда исследуемый образец находится в зазоре магнита и вне его, мы получим следующее:

$$\begin{cases} \frac{B_0 \cdot \Delta}{\mu_0} + \frac{B_m \cdot l_m}{\mu_0 \cdot \mu_m} = I \cdot w, \\ \frac{B_1 \cdot h}{\mu_1 \cdot \mu_0} + \frac{B_1}{\mu_0} \cdot (\Delta - h) + \frac{B_m \cdot l_m}{\mu_0 \cdot \mu_m} = I \cdot w \end{cases}, \quad (3)$$

где B_0 – магнитная индукция без образца (Тл), B_1 – магнитная индукция с образцом (Тл), B_m – магнитная индукция железа магнита (Тл), Δ – воздушный зазор (м), h – толщина образца (м), l_m – длина замкнутого контура железа магнита (м), μ_1 – магнитная проницаемость образца, μ_0 – магнитная постоянная (Гн/м), μ_m – магнитная проницаемость железа магнита, I – ток в катушке (А), w – количество витков катушки. В случае ненасыщенного железа, когда $B_m \leq 1,5$ Тл, его магнитная проницаемость достигает больших величин, следовательно, $H_m \cdot l_m \ll H_0 \cdot \Delta$, что позволяет нам пренебрегать влиянием образца на магнитную индукцию железа магнита [5].

Решая эти уравнения относительно μ_1 , получаем:

$$\mu_1 = \frac{1}{1 - \frac{\Delta}{h} \left(1 - \frac{B_0}{B_1}\right)}. \quad (4)$$

Относительная магнитная проницаемость может быть пересчитана в магнитную восприимчивость (χ), которая является безразмерной физической величиной и показывает связь между вектором намагниченности вещества (\vec{M}) с вектором напряженности внешнего магнитного поля (\vec{H}):

$$\chi = \frac{\bar{M}}{H} = \mu_1 - 1. \quad (5)$$

Из формул (4) и (5) можно получить зависимость изменения величины магнитного поля от магнитной восприимчивости и увидеть, что при малых значениях восприимчивости эта величина пропорциональна χ :

$$B_1 - B_0 = \chi \cdot \frac{h \cdot B_1}{\Delta \cdot (1 + \chi)}. \quad (6)$$

3. Результаты измерений

На рис. 1 показаны зависимости магнитной проницаемости исследуемых образцов аустенитной стали размерами $0,15 \times 0,15 \text{ м}^2$ (AISI 316L – толщина образца 0,0075 м, AISI 316LN – 0,0107 м, AISI 321 – 0,01 м, 12X18H10T – 0,0059 м) от индукции магнитного поля.

Как видно на рис. 1, с ростом поля магнитная проницаемость образцов уменьшается ввиду постепенного увеличения магнитного насыщения образцов. В зависимости от марки нержавеющей стали и ее состава это уменьшение будет происходить значительней.

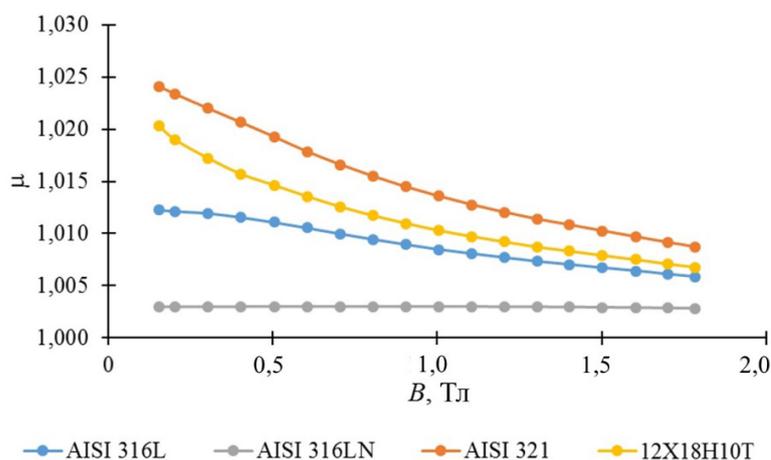


Рис. 1. Магнитная проницаемость исследуемых марок аустенитной стали
Fig. 1. Magnetic permeability of the studied grades of austenitic steel

На следующем этапе исследования образцы были подвержены термической обработке, в ходе которой нержавеющей стали помещали в печь, нагревали до температуры $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ и выдерживали в ней в течение 2 часов в целях остывания. Данную процедуру делают с целью внесения необходимых изменений в качественные показатели сплава, улучшения его состава и эксплуатационных возможностей. Если нагреть исследуемый образец выше точки Кюри и охладить в отсутствие магнитного поля, то его магнитная восприимчивость будет уменьшаться (рис. 2). Из графиков видно, что, например, магнитная проницаемость при поле 1,5 Тл для образца 321 улучшилась на 0,49 %, для 316LN увеличилась на 0,004 %. Если говорить о магнитной восприимчивости, то для образца 321 она улучшилась в 2 раза, для 316LN – практически не изменилась.

Помимо этого было изучено влияние TIG-сварки (Tungsten Inert Gas – ручная дуговая сварка с использованием неплавящегося электрода под защитой инертных газов, в нашем случае аргона) с использованием проволоки св.06X19H9T и электронно-лучевой сварки на нержаве-

ющую сталь разных марок (рис. 3–6). Сварочный шов был проварен по всей ширине заготовки в области $0,03 \times 0,13 \text{ м}^2$ с шагом между швами примерно $0,003\text{--}0,004 \text{ м}$. На этих же рисунках изображены данные, полученные при вакуумном отжиге при $T = 1020 \text{ °C}$ в течение 40 мин и остывании в печке. В табл. 2 показаны величины магнитной восприимчивости, полученные в ходе экспериментов.

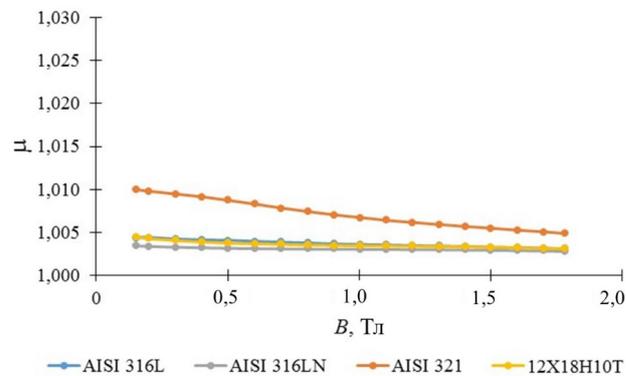


Рис. 2. Магнитная проницаемость исследуемых марок аустенитной стали после отжига в печи при $T = 1050 \text{ °C}$
 Fig. 2. Magnetic permeability of the studied grades of austenitic steel after annealing in a furnace at $T = 1050 \text{ °C}$

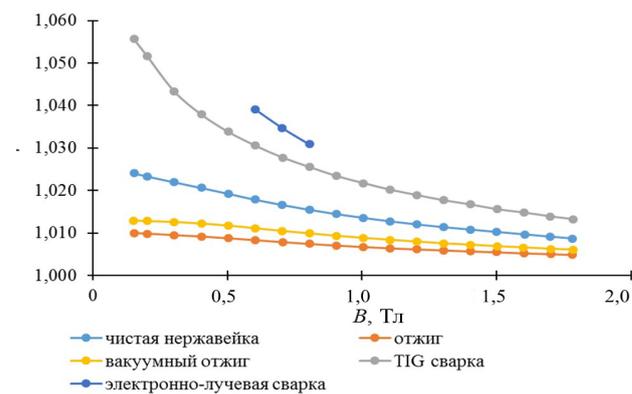


Рис. 3. Зависимость магнитной проницаемости нержавеющей стали марки AISI 321 после разных видов обработки
 Fig. 3. Dependence of magnetic permeability of stainless steel grade AISI 321 after different types of processing

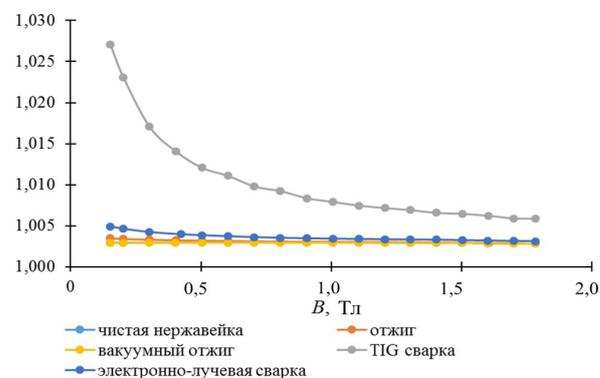


Рис. 4. Зависимость магнитной проницаемости нержавеющей стали марки AISI 316LN после разных видов обработки

Fig. 4. Dependence of magnetic permeability of stainless steel grade AISI 316LN after different types of processing

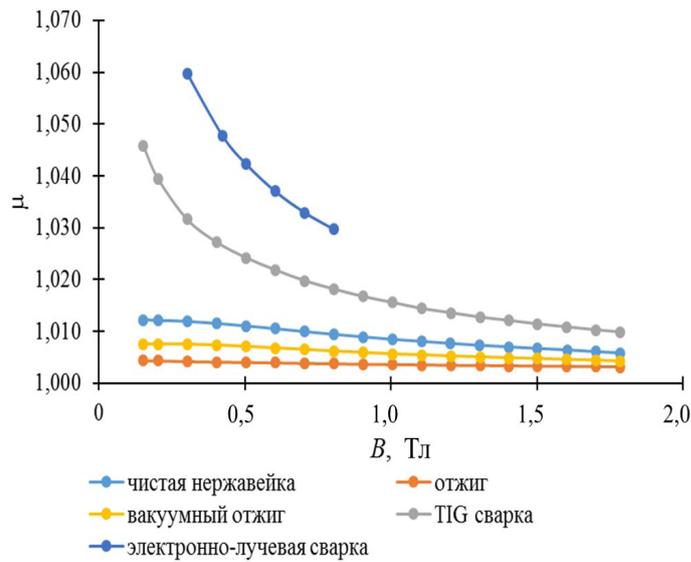


Рис. 5. Зависимость магнитной проницаемости нержавеющей стали марки AISI 316L после разных видов обработки

Fig. 5. Dependence of magnetic permeability of stainless steel grade AISI 316L after different types of processing

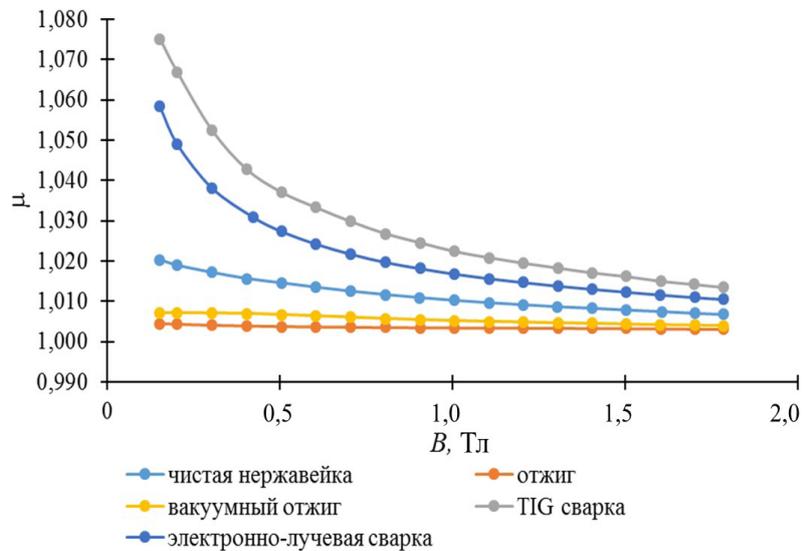


Рис. 6. Зависимость магнитной проницаемости нержавеющей стали марки 12X18N10T после разных видов обработки

Fig. 6. Dependence of magnetic permeability of stainless steel grade 12X18N10T after different types of processing

На рис. 7 в качестве примера показаны фотографии образца из стали типа AISI 316L до обработки и после внешнего воздействия.

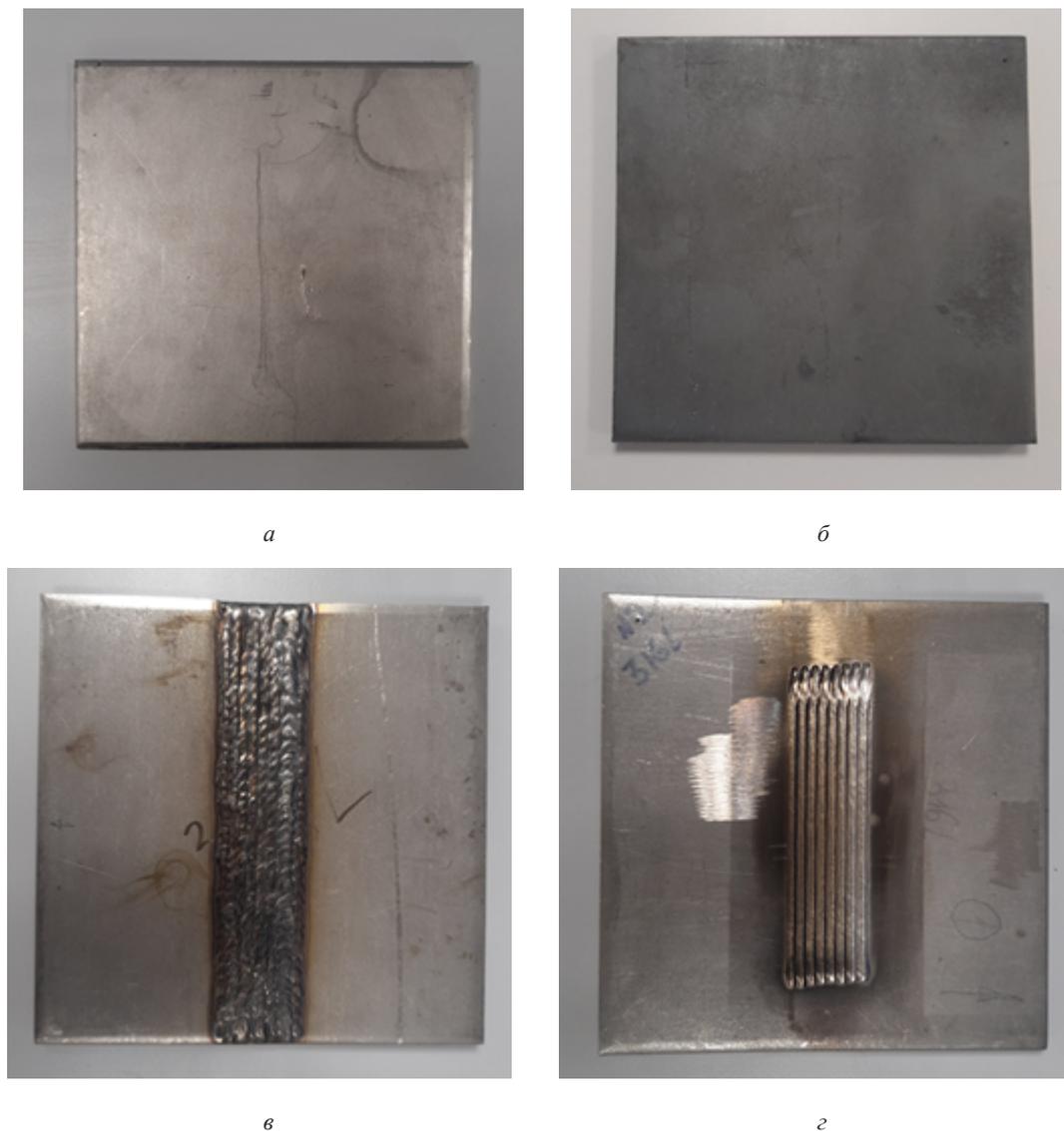


Рис. 7. Внешний вид изучаемого образца из нержавеющей стали типа AISI 316L: *а* – чистый образец; *б* – после отжига в печи; *в* – после TIG сварки; *г* – после электронно-лучевой сварки
Fig. 7. External appearance of the studied sample made of stainless steel type AISI 316L: *a* – clean sample; *б* – after annealing in a furnace; *в* – after TIG welding; *г* – after electron beam welding

Заклучение

После воздействия на исследуемые образцы немагнитной нержавеющей стали различными технологическими процессами было зафиксировано изменение величины магнитной проницаемости. Для удобства сравнение результатов будет приведено в единицах магнитной восприимчивости. Для стали типа AISI 316L после отжига магнитная восприимчивость уменьшилась в среднем в 2,4 раза, после вакуумного отжига – в 1,5 раза, после использования TIG- и электронно-лучевой сварок величина восприимчивости увеличилась в 2,1 и 3,8 раза соответственно. Для образца из AISI 321 были получены следующие результаты: после отжига χ уменьшилась в 2,1 раза, после вакуумного отжига – в 1,6 раза, после TIG- и электронно-лучевой сварок увеличилась в 1,7 и 2,1 раза соответственно. В случае нержавеющей стали AISI 316LN после отжига χ увеличилась в 1,05 раза, после вакуумного отжига не изменилась, по-

сле TIG-сварки увеличилась в 3,6 раза, после электронно-лучевой – в 1,2 раза. Что касается последнего образца (12X18H10T) – при отжиге магнитная восприимчивость упала в 3,2 раза, после вакуумного отжига – в 2,1 раза, после TIG-сварки χ возросла в 2,4 раза, а после электронно-лучевой – в 1,8 раза.

Таким образом, в рамках данной статьи был выявлен характер изменения величины магнитной проницаемости нержавеющей стали под воздействием термических обработок. Полученную информацию можно применять, например, при выборе и подготовке материала для изготовления вакуумных систем электрофизических установок.

Список литературы

1. **Collings E. W., Har S. C.** Low temperature magnetic susceptibility and magnetization studies of some commercial austenitic stainless steels // *Cryogenics*. September 1979. P. 521. [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(79\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0011-2275(79)90005-5)
2. **Larbalestier D. C., King H. W.** Austenitic stainless steels at cryogenic temperatures 1—Structural stability and magnetic properties // *Cryogenics*. March 1973. P. 160. [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(73\)90285-3](https://doi.org/10.1016/0011-2275(73)90285-3)
3. **Рябченко К. К., Пахомов А. Ю., Рыбицкая Т. В., Старостенко А. А.** Способы корректировки поля дипольного магнита // *ПТЭ*. 2019. № 6. С. 117. <https://doi.org/10.1134/S0032816219060132>
4. **Карпов Г. В.** ЯМР Магнитометр, Институт ядерной физики им. Будкера. Новосибирск, 2013.
5. **Персов Б. З.** Расчет и проектирование экспериментальных установок, Институт компьютерных исследований. Москва-Ижевск, 2006. С. 277.

References

1. **Collings E. W., Har S. C.** Low temperature magnetic susceptibility and magnetization studies of some commercial austenitic stainless steels // *Cryogenics*. September 1979. P. 521. [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(79\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0011-2275(79)90005-5)
2. **Larbalestier D. C., King H. W.** Austenitic stainless steels at cryogenic temperatures 1—Structural stability and magnetic properties // *Cryogenics*. March 1973. P. 160. [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(73\)90285-3](https://doi.org/10.1016/0011-2275(73)90285-3)
3. **Riabchenko K. K., Pakhomov A. Yu., Rybitskaya T. V., Starostenko A. A.** Methods of correcting the field of a dipole magnet // *IET*. 2019. № 6. P. 117. <https://doi.org/10.1134/S0032816219060132>
4. **Karpov G. V.** NMR Magnetometer, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, 2013.
5. **Persov B. Z.** Calculation and design of experimental installations, Institute of Computer Research. Moscow-Izhevsk, 2006. P. 277.

Приложение

Таблица

Зависимость магнитной восприимчивости образцов аустенитной стали
в зависимости от технической обработки

Table

Dependence of magnetic susceptibility of austenitic steel samples on technical treatment

Чистая нержавеющая сталь					Отжиг				
В, Тл	χ				В, Тл	χ			
	AISI 316L	AISI 321	AISI 316LN	12X18H10T		AISI 316L	AISI 321	AISI 316LN	12X18H10T
0,1522	0,012	0,024	0,00296	0,020	0,1522	0,004	0,010	0,00346	0,005
0,2020	0,012	0,023	0,00296	0,019	0,2021	0,004	0,010	0,00340	0,004
0,3023	0,012	0,022	0,00297	0,017	0,3024	0,004	0,009	0,00330	0,004
0,4028	0,012	0,021	0,00298	0,016	0,4029	0,004	0,009	0,00324	0,004
0,5033	0,011	0,019	0,00298	0,015	0,5034	0,004	0,009	0,00319	0,004
0,6038	0,011	0,018	0,00298	0,014	0,6040	0,004	0,008	0,00315	0,004
0,7043	0,010	0,017	0,00299	0,013	0,7046	0,004	0,008	0,00312	0,004
0,8045	0,009	0,015	0,00299	0,012	0,8051	0,004	0,007	0,00310	0,004
0,9046	0,009	0,014	0,00299	0,011	0,9054	0,004	0,007	0,00309	0,004
1,0045	0,008	0,014	0,00298	0,010	1,0054	0,004	0,007	0,00307	0,003
1,1044	0,008	0,013	0,00298	0,010	1,1054	0,004	0,006	0,00306	0,003
1,2040	0,008	0,012	0,00297	0,009	1,2051	0,003	0,006	0,00304	0,003
1,3034	0,007	0,011	0,00296	0,009	1,3045	0,003	0,006	0,00303	0,003
1,4023	0,007	0,011	0,00295	0,008	1,4035	0,003	0,006	0,00300	0,003
1,5004	0,007	0,010	0,00293	0,008	1,5017	0,003	0,005	0,00297	0,003
1,6048	0,006	0,010	0,00290	0,008	1,6020	0,003	0,005	0,00293	0,003
1,7009	0,006	0,009	0,00286	0,007	1,7012	0,003	0,005	0,00289	0,003
1,7835	0,006	0,009	0,00284	0,007	1,7831	0,003	0,005	0,00284	0,003

Вакуумный отжиг					TIG-сварка				
В, Тл	χ				В, Тл	χ			
	AISI 316L	AISI 321	AISI 316LN	12X18H10T		AISI 316L	AISI 321	AISI 316LN	12X18H10T
0,1521	0,008	0,013	0,00291	0,007	0,1522	0,046	0,056	0,02705	0,075
0,2020	0,008	0,013	0,00293	0,007	0,2021	0,039	0,052	0,02306	0,067
0,3023	0,008	0,013	0,00294	0,007	0,3025	0,032	0,043	0,01706	0,052
0,4028	0,007	0,012	0,00295	0,007	0,4029	0,027	0,038	0,01408	0,043
0,5033	0,007	0,012	0,00296	0,007	0,5035	0,024	0,034	0,01207	0,037
0,6039	0,007	0,011	0,00296	0,006	0,6041	0,022	0,031	0,01109	0,033
0,7045	0,007	0,010	0,00296	0,006	0,7046	0,020	0,028	0,00980	0,030
0,8049	0,006	0,010	0,00296	0,006	0,8051	0,018	0,026	0,00924	0,027
0,9052	0,006	0,009	0,00295	0,005	0,9054	0,017	0,023	0,00837	0,025
1,0053	0,006	0,009	0,00295	0,005	1,0055	0,016	0,022	0,00792	0,022
1,1053	0,005	0,008	0,00294	0,005	1,1053	0,014	0,020	0,00747	0,021
1,2050	0,005	0,008	0,00294	0,005	1,2050	0,014	0,019	0,00718	0,019
1,3045	0,005	0,008	0,00293	0,005	1,3045	0,013	0,018	0,00693	0,018
1,4035	0,005	0,007	0,002915	0,005	1,4035	0,012	0,017	0,00659	0,017
1,5018	0,005	0,007	0,00290	0,004	1,5018	0,011	0,016	0,00647	0,016
1,6002	0,005	0,007	0,00288	0,004	1,6021	0,011	0,015	0,00624	0,015
1,7012	0,004	0,006	0,00285	0,004	1,6995	0,010	0,014	0,00591	0,014
1,7836	0,004	0,006	0,00281	0,004	1,7839	0,010	0,013	0,00588	0,014

<i>Электронно-лучевая сварка</i>				
В, Тл	χ			
	AISI 316L	AISI 321	AISI 316LN	12X18H10T
0,1521			0,00490	0,058
0,2020			0,00461	0,049
0,3023	0,060		0,00423	0,038
0,4230	0,048		0,00395	0,031
0,5033	0,042		0,00384	0,027
0,6039	0,037	0,039	0,00372	0,024
0,7045	0,033	0,035	0,00361	0,022
0,8049	0,030	0,031	0,00353	0,020
0,9052			0,00347	0,018
1,0053			0,00343	0,017
1,1053			0,00339	0,016
1,2050			0,00336	0,015
1,3045			0,00333	0,014
1,4035			0,00330	0,013
1,5018			0,00326	0,012
1,6002			0,00321	0,012
1,7013			0,00316	0,011
1,7836			0,00313	0,011

Сведения об авторах

Рябченко Ксения Константиновна, младший научный сотрудник

Пахомов Алексей Юрьевич, младший научный сотрудник

Жиляев Константин Владимирович, младший научный сотрудник

Старостенко Александр Анатольевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Цыганов Александр Сергеевич, научный сотрудник

Information about the Authors

Kseniia K. Riabchenko, Junior Researcher

Aleksey Yu. Pakhomov, Junior Researcher

Konstantin V. Zhilyaev, Junior Researcher

Aleksandr A. Starostenko, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher

Aleksandr S. Tsyganov, Researcher

*Статья поступила в редакцию 03.07.2024;
одобрена после рецензирования 11.11.2024; принята к публикации 24.02.2025*

*The article was submitted 03.07.2024;
approved after reviewing 11.11.2024; accepted for publication 24.02.2025*