

ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ОТЖИГА НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИКЕЛЯ И НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Перов В.Н., Костин В.Н.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.

Ельцина, Екатеринбург, Россия

perovadim22@gmail.com kostin@imp.uran.ru

Аннотация. Описаны области применения материалов и важность железоникелевых сплавов для промышленности. Исследовано изменение магнитных характеристик никеля и низкоуглеродистой стали 09Г2 при деформации и последующем отжиге. Показано, что магнитные свойства материалов меняются в очень широком диапазоне. В частности, коэрцитивная сила никеля монотонно уменьшается в 25 раз при увеличении температуры отжига.

Ключевые слова: никель, сталь 09Г2, отжиг, ферромагнетики, холодная пластическая деформация, железоникелевые сплавы.

INFLUENCE OF COLD PLASTIC DEFORMATION AND SUBSEQUENT ANNEALING ON THE MAGNETIC CHARACTERISTICS OF NICKEL AND LOW-CARBON STEEL

Perov V., Kostin V.

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The fields of application of materials and the importance of iron-nickel alloys for industry are described. The change in the magnetic characteristics of nickel and low-carbon steel 09G2 during deformation and subsequent annealing is investigated. It is shown that the magnetic properties of materials vary over a very wide range. In particular, the coercive force of nickel decreases monotonically by a factor of 25 with an increase in the annealing temperature.

Key words: nickel, steel 09G2, annealing, ferromagnets, cold plastic deformation, iron-nickel alloys.

1. Введение

Лежащие в основе магнитной структуроскопии взаимосвязи кристаллографической и магнитной структур ферромагнетиков являются сложными и неоднозначными. Поиск новых структурно-чувствительных

параметров является основной задачей структуроскопии ферромагнитных материалов.

Процессы, которые происходят в образцах при термической обработке, такие как возврат и рекристаллизация, служат для понимания структурных превращений, и следовательно, для понимания изменения магнитных свойств исследуемых материалов.

Никель широко применяется в современном производстве и технике. Никель используется для изготовления различных сплавов с металлами, например с железом, хромом, медью и другими. Полученные сплавы могут обладать высокими магнитными, антикоррозионными и электрическими свойствами.

В работах [1] и [2] рассмотрены специальные сплавы на основе никеля, представляющие собой необычный класс металлических материалов с исключительным сочетанием высокотемпературной прочности, ударной вязкости и стойкости к разрушению в агрессивных или окислительных средах. среды, а также их химический состав и микроструктура. Эти сплавы широко используются в качестве функциональных теплозащитных покрытий в авиационных и энергетических турбинах [3], ракетных двигателях, нефтехимических установках, атомной энергетике, судовом оборудовании для защиты изделий, подвергающихся интенсивным температурным воздействиям. и силовые воздействия.

Сталь 09Г2 широко применяется для изготовления труб, стоек, ферм, верхних обвязок вагонов, хребтовых балок и других деталей вагоностроения, деталей экскаваторов, элементов сварных металлоконструкций и других деталей, работающих при температуре от -40°C до $+450^{\circ}\text{C}$.

Однако, наибольший интерес представляют сплавы на железоникелевой основе, которые в зависимости от процентного содержания металлов, могут обладать аномальными физическими свойствами.

Например, в статье [4], рассматривается сплав, включающий в себя около 36% никеля и 64% железа, который называется инвар. Его особенность в том, что он имеет чрезвычайно низкий коэффициент теплового расширения в широком диапазоне температур. Такой сплав широко применяется в качестве биметалла для автоматических выключателей, средств управления двигателем, пружин для компенсации температуры телевизоров, термостатов для приборов и обогревателей, элементов управления аэрокосмической и автомобильной промышленности, систем отопления и кондиционирования воздуха. [5]

Другим видом важных железоникелевых сплавов является элинвар. Он обладает температурно-независимым модулем упругости в широком диапазоне температур. Элинварные сплавы находят свое применение в тех случаях, когда

требуется стабильность упругих свойств, например в часовых механизмах, датчиках давления и системах автоматизации строительного производства. [6]

В статье [7] рассмотрен еще один вид железоникелевых сплавов – пермаллой. Данный сплав обладает выдающимися магнитными свойствами: очень высокая максимальная относительная магнитная проницаемость, низкая коэрцитивная сила, хорошая способность формировать цикл гистерезиса, очень низкие магнитные потери, выраженная способность легко поддаваться холодной прокатке.

Целью данной работы является экспериментальное исследование и анализ влияния пластической деформации и последующего отжига на комплекс магнитных характеристик никеля и низкоуглеродистой стали. Работа выполнена в рамках исследования напряженно-деформированного состояния железоникелевых сплавов. [8]

2. Образцы и методика измерений

Предметом исследования выбраны две группы образцов: первая – технически чистый никель, вторая – конструкционная низкоуглеродистая сталь 09Г2. Обе группы образцов подвергались холодной пластической деформации (60% – никель, 72% – сталь 09Г2), последующей обработке шлифованием и отжигу при различных температурах, выдержке в течение часа и охлаждению на воздухе.

Магнитные свойства испытуемых образцов, такие как остаточная магнитная индукция (B_r), коэрцитивная сила (H_c), максимальная магнитная проницаемость (μ_{max}), максимальная напряженность магнитного поля (H_{max}), максимальная магнитная индукция (B_{max}) и максимальная намагниченность (J_{max}), измеряли на магнитоизмерительном комплексе Remagraph C-500.

3. Результаты и их обсуждения

Рисунок показывает изменение структурочувствительных магнитных характеристик никеля с ростом температур отжига. Видно, что коэрцитивная сила уменьшается в 25 раз с увеличением температуры отжига; в интервале температур 300–400 градусов наблюдается достаточно резкое падение коэрцитивной силы. Эти изменения связаны с перестройкой доменной структуры никеля при отжиге. Это существенное изменение обусловлено совместным действием уменьшения внутренних напряжений, уменьшения плотности дислокаций и увеличения среднего размера зерна в результате рекристаллизации.

Видно также увеличение магнитной проницаемости никеля, начиная с 400 градусов, с повышением температуры отжига, что справедливо, так как коэрцитивная сила уменьшается. Кроме того, увеличивается коэффициент Рэлея,

который характеризует динамику намагниченности никеля и показывает вклад необратимых процессов при намагничивании.

В статье [9] приведен магнитный анализ процессов рекристаллизации при отжиге в холоднодеформированном никеле.

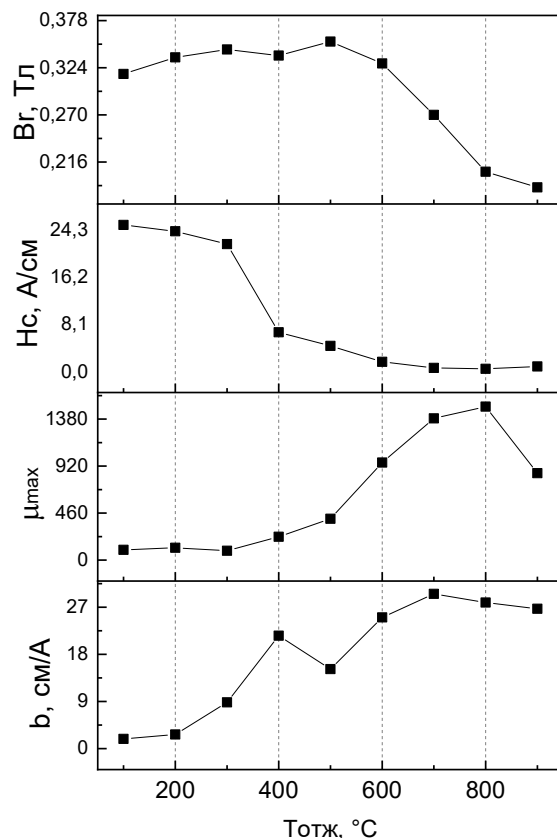


Рисунок 1 - Графики зависимостей структурочувствительных характеристик холоднодеформированного никеля от температур отжига

В таблице приведены структурочувствительные характеристики холоднодеформированной низкоуглеродистой стали 09Г2 после отжига.

Таблица 1. Магнитные характеристики низкоуглеродистой стали 09Г2 после деформации и отжига.

№ образца	T _{отж} , °C	B _r , Tл	H _c , А/см	μ _{max}	b, см/А
1	Не отожжён	0,896	7,26	510	2,89
2	300	1,02	6,07	680	3,86
3	550	1,41	4,55	1163	8,37

Также видно, что с ростом температуры отжига падает коэрцитивная сила, но растут максимальная магнитная проницаемость и коэффициент Рэлея, что

говорит о перестройке доменной структуры в стали и снятии внутренних напряжений с ростом температуры отжига.

4. Заключение

Показана актуальность исследования свойств железо-никелевых сплавов. Установлено, что холодная пластическая деформация и последующий отжиг приводят к очень значительным изменениям магнитных свойств никеля и стали 09Г2. Коэрцитивная сила холоднодеформированного никеля монотонно уменьшается в 25 раз с увеличением температуры отжига от 100 до 900 °С, а магнитная проницаемость возрастает более, чем в 15 раз. Магнитные свойства холоднодеформированной стали 09Г2 менее чувствительны к последующему отжигу.

Благодарности

Работа выполнена в рамках XXV Областного конкурса НИРС учреждений высшего и среднего образования Свердловской области «Научный Олимп».

Библиографический список

1. Pollock, Teresa M. Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure, and Properties [Текст] / Tresa M. Pollock, Sammy Tin // Journal of propulsion and power. – 2006. – i.2. – p. 361-374.
2. Thakur, A. State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys [Текст] / A. Thakur, S. Gangopadhyay // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2015. – i.2. – p. 1-64.
3. Furrer, D. Ni-Based Superalloys for Turbine Discs [Текст] / D. Furrer, H. Fecht // The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. – 1999. – i.51. – p. 14-17.
4. Sahoo, A. Fe-Ni Invar alloys: A review [Текст] / A. Sahoo, V.R.R. Medicherla // Materials Today: Proceedings. – 2021. – i.43. – p. 2242-2244.
5. Горовой, А.М. Управление динамическим диапазоном рабочего слоя на Fe-Ni пленках в аварийных бортовых накопителях информации [Текст] / А. М. Горовой, А. Н. Малов, Д. А. Сафронов, М. В. Шмидт // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2004. – №1. – С. 161-167.
6. Qin, F. Resolution of a discrepancy of magnetic mechanism for Elinvar anomaly in Fe-Ni based alloys [Текст] / F.Qin, W. Xiao, F. Lu, Y. Ji, X. Zhao, X. Ren // Journal of Materials Science & Technology. – 2019. – i.35. – p. 396-401.
7. Waeckerléa, T. Evolution and recent developments of 80%Ni permalloys [Текст] / T. Waeckerléa, A. Demiera, F. Godardb, H. Fraissea // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2020. – i.505. – p. 1-8.
8. Kostin, V.N. Effect of mechanical deformation on the magnetic characteristics of ferromagnetic objects made of Fe-Ni alloys [Текст] / V. N. Kostin,

E. D. Serbin, O. N. Vasilenko, V. N. Perov // AIP Conference Proceedings. – 2022. – V. 2466. – P. 60028-60034.

9. Костин В. Н. Магнитный анализ процессов рекристаллизации при отжиге холоднодеформированного никеля [Текст] / В. Н. Костин, В. Н. Перов, Л. В. Михайлов, Е. Д. Сербин, О. Н. Василенко // Дефектоскопия. – 2022. – №.11. – С. 23-31.