

ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА ИЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ СИСТЕМЫ Fe-Si

Ян Цзюнь

yantsyun@qq.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Представлено назначение электротехнической стали с содержанием 6,5 % кремния. Показана возможность получения электротехнической стали с высоким содержанием кремния методом лазерной наплавки. Исследован исходный порошок сплава Fe – 6,5 % Si. Описаны результаты химического анализа порошка и геометрические характеристики образцов. Для получения трех образцов с различными толщинами методом лазерной наплавки использовали систему лазерной наплавки металла INSSTEK MX-GRANDE. Проанализированы металлографическая структура и свойства образца сплава Fe – 6,5 % Si с использованием металлографического микроскопа Olympus GX51 и микротвердомера Prüftechnik KB50 SR. Показано, что структура сплава представляет собой однофазный феррит, в образцах среднего и толстого слоев появляются трещины, появление которых связано с высокими термическими напряжениями, возникающими при лазерной перекристаллизации материала. Твердость сплава составляет $HV_{0,05}$ 410–430. Высокое значение твердости сплава связано с твердорастворным упрочнением феррита кремнием (6,5 % Si) и с высокой концентрацией дефектов кристаллического строения, сформированных при лазерной перекристаллизации порошкового материала.

Ключевые слова

Лазерная наплавка, электротехническая сталь, кинетика, сплав Fe – 6,5 % Si, микроструктура, микротвердость, упрочнение твердым раствором

Поступила в редакцию 08.09.2023

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

Введение. Электротехническая сталь представляет собой незаменимый в электроэнергетике, электронике и машиностроении магнитомягкий сплав, а также является металлургическим функциональным материалом с наибольшей производительностью. Его в основном используют для изготовления сердечников различных двигателей, генераторов и трансформаторов [1]. По сравнению с обычной электротехнической сталью электротехническая сталь с содержанием кремния 6,5 % имеет более высокую магнитную проницаемость и меньшие потери на гистерезис, а также может демонстрировать самые лучшие характеристики в условиях высоких частот, поэтому она используется в высокочастотных трансформаторах и широко применяется в высокочастотных индукторах [2–5].

Однако ограниченная обрабатываемость высококремнистых сталей из-за наличия разноупорядоченных фаз, т. е. B2 (FeSi) и D03 (Fe₃Si), сильно затрудняет использование традиционной технологии прокатки [6–9].

Технология лазерной наплавки характеризуется высокой точностью обработки и качеством поверхности, позволяет точно контролировать глубину наплавки и размер расплавленной ванны, чтобы сырье можно было использовать в максимальной степени, а также позволяет точно контролировать структуру сплава, оптимизировать характеристики электротехнической стали [10–12]. С учетом вышеперечисленных факторов технология лазерной наплавки можно использовать для получения электротехнической стали с содержанием кремния 6,5 %. Такой способ имеет высокую технологичность и потенциал. Однако стоимость оборудования и материалов для технологии лазерной наплавки относительно высока, а производственные затраты и выгоды необходимо рассматривать всесторонне в соответствии с конкретными условиями применения.

Технология лазерной наплавки имеет ряд преимуществ перед другими традиционными методами. Основными из них являются: высокая энергия лазерного луча; большая скорость затвердевания и мелкое зерно; гладкий внешний вид; плотная микроструктура; однородный химический состав; легкий контроль параметров процесса; высокая эффективность и экология производства; низкое энергопотребление и высокой производительность [11–13].

Цель этой работы — исследование структуры и свойств электротехнической стали Fe – 6,5 % Si, полученного методом лазерной наплавки.

Материал и методика исследования. Для получения образцов электротехнической стали Fe – 6,5 % Si использовали железный порошок с процентным содержанием кремния около 6,5 %. Химический состав порошка представлен в табл. 1.

Таблица 1. Результаты химического анализа порошка

| Элемент | Доля, % |
|---------|-----------|
| Si | 6,50–6,54 |
| Mn | 0,60–0,62 |
| Cr | 0,50–0,52 |
| P | 0,04–0,45 |
| S | 0,02–0,25 |
| Fe | Остальное |

В качестве подложки для проведения эксперимента использовали сталь 12X18H10T.

Для образцов, полученных методом лазерной наплавки, применяли систему лазерной наплавки металла INSSTEK MX-GRANDE с многослойным и многоканальным сканированием. Таким образом были получены образцы из сплава

Fe – 6,5 % Si различной толщины. При испытаниях были заданы оптимизированные параметры процесса: мощность 600 Вт, скорость сканирования 0,6 м/мин, расход порошка 10 г/мин.

Из полученных образцов были подготовлены шлифы и выполнен их металлографический анализ на микроскопе Olympus GX51; а также определена микротвердость $HV_{0,05}$ с помощью микротвердомера Pruftechnik KB50 SR.

В работе проведен эмиссионный спектральный анализ для определения концентрации углерода на поверхности исследуемых образцов с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с лазерным возбуждением спектров модели SPECS LAES MATRIX.

Результаты исследования и анализ. Общий вид применяемого порошка представлен на рис. 1. Также были проведены наблюдения и измерения формы порошка на лазерном микроскопе.

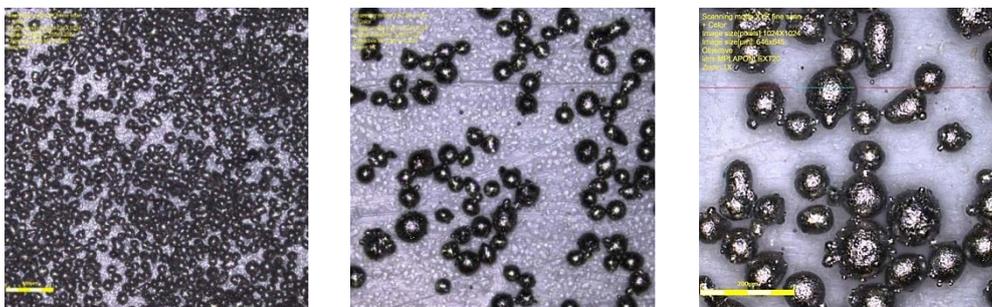


Рис. 1. Общий вид исследуемого порошка Fe – 6,5 %Si при разном увеличении

Из представленных на рисунке изображений видно, что исследуемый порошок обладает неоднородной формой и размерами. Наряду с шарообразными порошинками наблюдаются вытянутые объекты с неровными краями. Размеры порошинок варьируются в широком диапазоне: от 80 до 120 мкм. Наличие неоднородностей формы и большие размеры делают недоступным использование этих порошков в ряде аддитивных технологий (селективное лазерное плавление) [14, 15].

Для проведения исследований были получены три образца разной высоты. Для упрощения все образцы были обозначены условно: 1 — самый тонкий образец, 2 — средний по высоте образец; 3 — самый толстый образец. Размер и число слоев образцов приведены в табл. 2. Изображение полученных образцов представлено на рис. 2.

Изображения микроструктур для каждого из полученных образцов представлено на рис. 3 и 4. На рис. 3 представлены соответственно тонкий, средний и толстый образцы, полученные методом лазерной наплавки и не имеющие дефектов. На рис. 4 представлены соответственно тонкий, средний и толстый образцы, полученные методом лазерной наплавки и имеющие дефекты.

Таблица 2. Геометрические характеристики трехмерных образцов

| Характеристика | Номер образца | | |
|--------------------|---------------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Число слоев | 4 | 6 | 10 |
| Средняя высота, мм | 1,649 | 3,355 | 6,269 |
| Средняя ширина, мм | 12,14 | 11,192 | 11,827 |

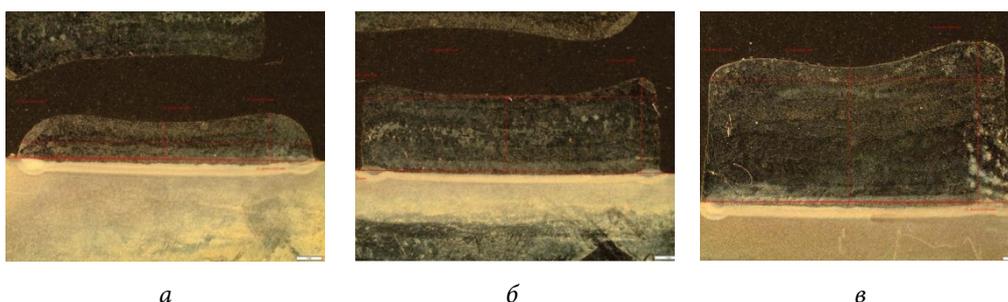


Рис. 2. Изображение полученных образцов:

a — тонкий образец 1; *б* — средний образец 2; *в* — толстый образец 3

Изображения микроструктур для каждого из полученных образцов представлено на рис. 3 и 4. На рис. 3 показаны соответственно тонкий, средний и толстый образцы, полученные методом лазерной наплавки и не имеющие дефектов. На рис. 4 представлены соответственно тонкий, средний и толстый образцы, полученные методом лазерной наплавки и имеющие дефекты.

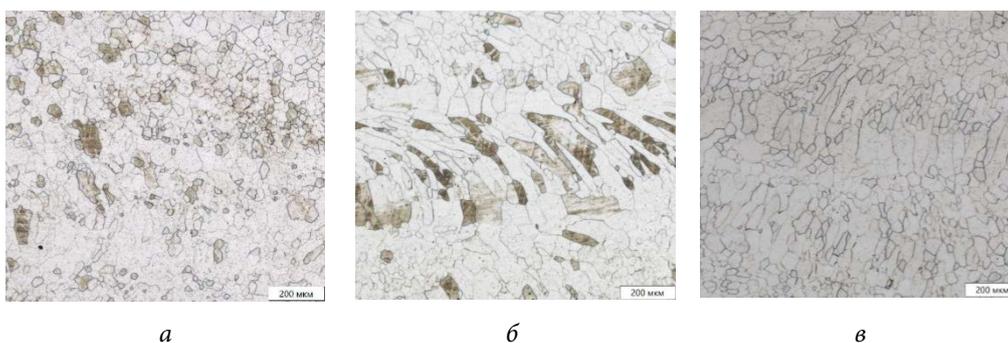


Рис. 3. Микроструктура образцов, не имеющих дефектов:

a — тонкий образец 1; *б* — средний образец 2; *в* — толстый образец 3

Из представленных выше изображений видно, что материал обладает однофазной ферритной структурой. Небольшая анизотропия присутствует только в зоне переплава, что предположительно может быть связано с высоким теплоотводом в материал-основу.

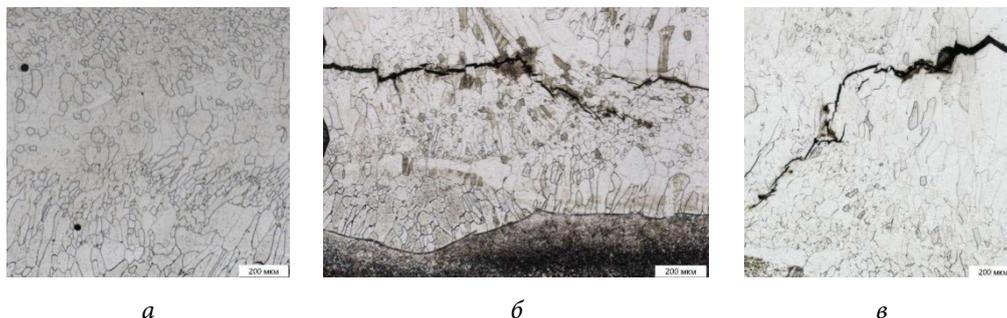


Рис. 4. Металлография шлифов с дефектом
a — тонкий образец 1; *б* — средний образец 2; *в* — толстый образец 3

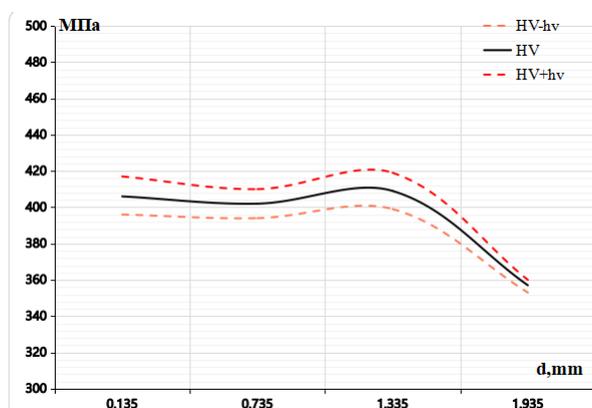
Установлено наличие трещин и пор в некоторых образцах. В образцах 2 (среднем) и 3 (толстом) обнаружены трещины у подложки. При этом во всех образцах отмечено наличие некоторой пористости. Количество пор мало, размер пор небольшой, поэтому их влиянием на структуру и свойства материала можно пренебречь. Пористость обусловлена быстрым охлаждением расплавленного металла во время процесса охлаждения, когда газ осаждается в расплавленной ванне, не имея возможности выйти вовремя. Предполагается, что наличие трещин в образцах 2 (средний) и 3 (толстый) может быть связано с напряжением, возникающим при плавлении и охлаждении металла в процессе лазерной наплавки. По мере увеличения толщины образца напряжение не может релаксировать и постепенно увеличивается, а поскольку в подложке подогрев отсутствует, будет происходить неравномерное охлаждение и усадка материала. Одновременно напряжения возникают и в наплавленном слое, что в конечном счете приведет к трещинам в материале. Для получения более точных объяснений касательно причин появления трещин необходимо провести дополнительные исследования.

В наплавленном слое наблюдается достаточно большой разброс по размеру зерна, что может вызвать некоторые дефекты в магнитном поле. Размер зерна находится в диапазоне приблизительно от 10 до 100 мкм, что соответствует размерам зерна в большинстве электротехнических материалов [16, 17]. Для выравнивания размера зерна предполагается дополнительная термообработка.

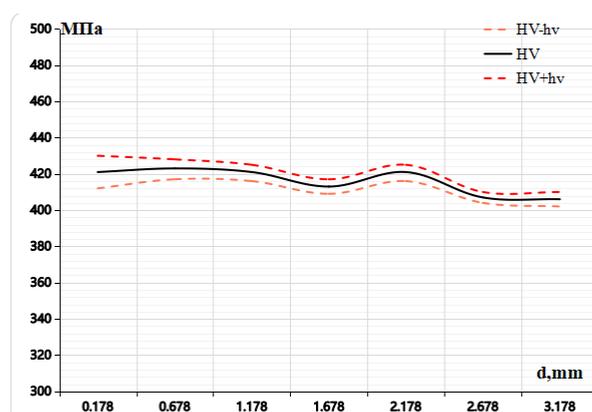
Исследования показали, отсутствие неоднородности намагничивания образцов по различным направлениям.

Измерение микротвердости проводили по глубине и ширине наплавленного слоя образцов. Определяли 3 группы значений твердости для каждого образца по ширине наплавленного слоя, выбирали 4 точки для каждой группы в соответствии с глубиной наплавленного слоя для тонких образцов, 7 точек для каждой группы в соответствии с глубиной наплавленного слоя для средних образцов и 11 точек для каждой группы в соответствии с глубиной наплавленного слоя для толстых образцов. Были рассчитаны среднее значение и стандартное

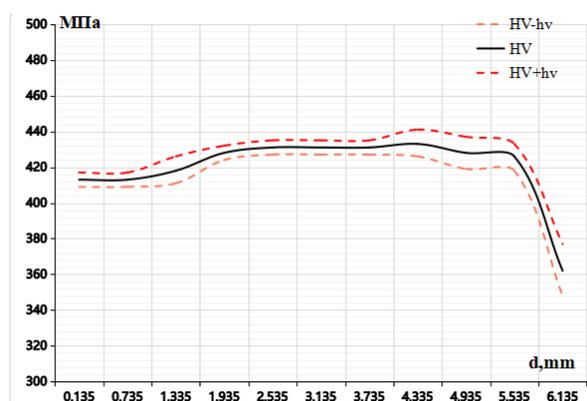
отклонение их твердости, по этим значениям построены графики их твердости в зависимости от толщины образца (рис. 5).



а



б



в

Рис. 5. Изменение твердости в наплавленном слое исследуемых образцов:
а — тонкий образец 1; б — средний образец 2; в — толстый образец 3

Представленные выше результаты измерений показали, что твердость сплава составляет $HV_{0,05}$ 410–430 МПа. Высокое значение твердости сплава связано с твердорастворным упрочнением феррита кремнием (6,5 % Si) и с высокой концентрацией дефектов кристаллического строения, сформированных при лазерной перекристаллизации порошкового материала. Значительное уменьшение твердости в зоне сплавления наплавки (Fe – 6,5 % Si) и подложки, по-видимому, связано с наличием переходной зоны между наплавкой и подложкой.

Заключение. По итогам исследования можно сделать следующие выводы.

1. По данным металлографического анализа структура сплава Fe – 6,5 % Si после лазерной наплавки однофазная ферритная.

2. В образце, состоящем из тонкого слоя наплавки, трещины отсутствуют. Однако в образцах, состоящих из среднего и толстого слоя наплавки, появляются трещины. Их появление связано с высокими термическими напряжениями, возникающими при лазерной перекристаллизации материала.

3. Твердость сплава составляет $HV_{0,05}$ 410–430 МПа. Высокое значение твердости сплава связано с твердорастворным упрочнением феррита кремнием (6,5 % Si) и с высокой концентрацией дефектов кристаллического строения, сформированных при лазерной перекристаллизации порошкового материала.

Литература

- [1] Chen Zhuo. The trend of electrical steel in china under the background of “double carbon”. *Electrical Steel*, 2022, vol. 4 (1), pp. 1–4.
- [2] Swann P.R., Duff W.R., Fischer R.M. Electron metallography of a non-classical order-disorder transition. *Physica Status Solidi*, 1970, vol. 37, pp. 577–583.
<https://doi.org/10.1002/pssb.19700370209>
- [3] Swann P.R., Granas L., Lehtinen B. The B2 and DO3 ordering reactions in iron–silicon alloys in the vicinity of the Curie temperature. *Metal Science*, 1975, vol. 9, pp. 90–96.
<https://doi.org/10.1179/030634575790445279>
- [4] Yu J.H., Shin J.S., Bae J.S. et. al. The effect of heat treatments and Si contents on B2 ordering reaction in high-silicon steels. *Materials Science and Engineering*, 2001, A 307, pp. 29–34. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01960-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01960-2)
- [5] Viala B., Degauque J., Barico M., Ferrara E., Fiorillo F. Study of the brittle behavior of annealed Fe-6.5 wt% Si ribbons produced by planar flow casting. *Materials Science and Engineering*, 1996, A 212, pp. 62–68. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(96\)10188-X](https://doi.org/10.1016/0921-5093(96)10188-X)
- [6] Shin J.-S., Lee Z.-H., Lee T.-D. et. al. The effect of casting method and heat treating condition on cold workability of high-Si electrical steel. *Scripta Materialia*, 2001, vol. 45, pp. 725–731. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(01\)01086-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(01)01086-7)
- [7] Arai K., Ishiyama K. Recent developments of new soft magnetic materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1994, vol. 133, pp. 233–237.
[https://doi.org/10.1016/0304-8853\(94\)90534-7](https://doi.org/10.1016/0304-8853(94)90534-7)
- [8] Matsumura S., Tanaka Y., Oki K. Concurrent ordering and phase separation in the vicinity of the metastable critical point of order–disorder transition in Fe–Si alloys. *Materials Science and Engineering*, 2001, A 312, pp. 284–292.
[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01874-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01874-8)

- [9] Bouchara D., Fagot M., Degauque J. et. al. Ordering influence on magnetic properties of rapidly quenched Fe-6.5 wt% Si. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1990, vol. 83, pp. 377–378. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(90\)90554-4](https://doi.org/10.1016/0304-8853(90)90554-4)
- [10] Manna I., Dutta Majumdar J., Nayak S. et al. Laser surface cladding of Fe-B-C, Fe-B-Si and Fe-BC-Si-Al-C on plain carbon steel. *J. Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 201 (1–2), pp. 434–440. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.11.138>
- [11] Lee J.-Y., An J., Chua C.K. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *Appl. Mater. Today*, 2017, vol. 7, pp. 120–133. <http://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.02.004>
- [12] Li N., Huang S., Zhang G. et. al. Progress in additive manufacturing on new materials: A review. *J. Mater. Sci. Technol*, 2019, vol. 35, pp. 242–269. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.002>
- [13] Magisetty R., Cheekuramelli N.S. Additive manufacturing technology empowered complex electromechanical energy conversion devices and transformers. *Appl. Mater. Today*, 2019, vol. 14, pp. 35–50. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2018.11.004>
- [14] Meier C., Weissbach R., Weinberg J. et. al. Critical influences of particle size and adhesion on the powder layer uniformity in metal additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, vol. 266, pp. 484–550. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.10.037>
- [15] Pleass C., Sathiskumar Jothi. Influence of powder characteristics and additive manufacturing process parameters on the microstructure and mechanical behaviour of Inconel 625 fabricated by Selective Laser Melting. *Additive Manufacturing*, 2018, vol. 24, pp. 419–431. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.09.023>
- [16] Yu Kuan Lu, Guo Qing Zu, Liang Luo et. al. Investigation of microstructure and properties of strip-cast 4.5 wt% Si non-oriented electrical steel by different rolling processes. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, vol. 497, 165975. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165975>
- [17] Hai-Tao Liu, Yin-Ping Wang, Ling-Zi An, et. al. Effects of hot rolled microstructure after twin-roll casting on microstructure, texture and magnetic properties of low silicon non-oriented electrical steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, vol. 420, pp. 192–203. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.07.034>

Ян Цзюнь — студент кафедры «Материаловедение», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Пахомова Светлана Альбертовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация. E-mail: pahomo@bmstu.ru, SPIN-код 7042-6638.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ян Цзюнь. Лазерная наплавка из электротехнической стали системы Fe-Si. *Политехнический молодежный журнал*, 2023, № 09 (86).

<http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-9-932>

LASER SURFACING OF THE Fe-Si SYSTEM ELECTRICAL STEEL

Yang Jun

yantsyun@qq.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper presents the purpose of electrical steel containing 6.5 % of silicon. It demonstrates possibility of producing electrical steel with high silicon content using the laser surfacing. Initial powder of the Fe – 6.5 % Si alloy was studied. The powder chemical analysis results and the samples' geometric characteristics are described. To obtain three samples with different thicknesses using laser surfacing, the INSSTEK MX-GRANDE metal laser surfacing system was used. The Fe – 6.5 % Si alloy sample metallographic structure and properties were analyzed using the Olympus GX51 metallographic microscope and a Pruftechnik KB50 SR microhardness tester. It is shown that the alloy structure appears to be a single-phase ferrite. Cracks appeared in the middle and thick layer samples, their appearance was associated with high thermal stresses arising during laser recrystallization of the material. The alloy hardness was HV0.05 410–430. The alloy hardness high value was associated with the ferrite solid-solution strengthening by silicon (6.5 % Si) and with high concentration of defects in the crystal structure formed during laser recrystallization of the powder material.

Keywords

Laser surfacing, electrical steel, kinetics, Fe – 6.5 % Si alloy, microstructure, microhardness, solid-solution strengthening

Received 08.09.2023

© Bauman Moscow State Technical University, 2023

References

- [1] Chen Zhuo. The trend of electrical steel in china under the background of “double carbon”. *Electrical Steel*, 2022, vol. 4 (1), pp. 1–4.
- [2] Swann P.R., Duff W.R., Fischer R.M. Electron metallography of a non-classical order-disorder transition. *Physica Status Solidi*, 1970, vol. 37, pp. 577–583. <https://doi.org/10.1002/pssb.19700370209>
- [3] Swann P.R., Granas L., Lehtinen B. The B2 and DO3 ordering reactions in iron-silicon alloys in the vicinity of the Curie temperature. *Metal Science*, 1975, vol. 9, pp. 90–96. <https://doi.org/10.1179/030634575790445279>
- [4] Yu J.H., Shin J.S., Bae J.S. et. al. The effect of heat treatments and Si contents on B2 ordering reaction in high-silicon steels. *Materials Science and Engineering*, 2001, A 307, pp. 29–34. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01960-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01960-2)
- [5] Viala B., Degauque J., Barico M., Ferrara E., Fiorillo F. Study of the brittle behavior of annealed Fe-6.5 wt% Si ribbons produced by planar flow casting. *Materials Science and Engineering*, 1996, A 212, pp. 62–68. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(96\)10188-X](https://doi.org/10.1016/0921-5093(96)10188-X)

-
- [6] Shin J.-S., Lee Z.-H., Lee T.-D. et. al. The effect of casting method and heat treating condition on cold workability of high-Si electrical steel. *Scripta Materialia*, 2001, vol. 45, pp. 725–731. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(01\)01086-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(01)01086-7)
- [7] Arai K., Ishiyama K. Recent developments of new soft magnetic materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1994, vol. 133, pp. 233–237. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(94\)90534-7](https://doi.org/10.1016/0304-8853(94)90534-7)
- [8] Matsumura S., Tanaka Y., Oki K. Concurrent ordering and phase separation in the vicinity of the metastable critical point of order–disorder transition in Fe–Si alloys. *Materials Science and Engineering*, 2001, A 312, pp. 284–292. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01874-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01874-8)
- [9] Bouchara D., Fagot M., Degauque J. et. al. Ordering influence on magnetic properties of rapidly quenched Fe-6.5 wt% Si. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1990, vol. 83, pp. 377–378. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(90\)90554-4](https://doi.org/10.1016/0304-8853(90)90554-4)
- [10] Manna I., Dutta Majumdar J., Nayak S. et al. Laser surface cladding of Fe-B-C, Fe-B-Si and Fe-BC-Si-Al-C on plain carbon steel. *J. Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 201 (1–2), pp. 434–440. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.11.138>
- [11] Lee J.-Y., An J., Chua C.K. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *Appl. Mater. Today*, 2017, vol. 7, pp. 120–133. <http://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.02.004>
- [12] Li N., Huang S., Zhang G. et. al. Progress in additive manufacturing on new materials: A review. *J. Mater. Sci. Technol.*, 2019, vol. 35, pp. 242–269. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.002>
- [13] Magisetty R., Cheekuramelli N.S. Additive manufacturing technology empowered complex electromechanical energy conversion devices and transformers. *Appl. Mater. Today*, 2019, vol. 14, pp. 35–50. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2018.11.004>
- [14] Meier C., Weissbach R., Weinberg J. et. al. Critical influences of particle size and adhesion on the powder layer uniformity in metal additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, vol. 266, pp. 484–550. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.10.037>
- [15] Pleass C., Sathiskumar Jothi. Influence of powder characteristics and additive manufacturing process parameters on the microstructure and mechanical behaviour of Inconel 625 fabricated by Selective Laser Melting. *Additive Manufacturing*, 2018, vol. 24, pp. 419–431. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.09.023>
- [16] Yu Kuan Lu, Guo Qing Zu, Liang Luo et. al. Investigation of microstructure and properties of strip-cast 4.5 wt% Si non-oriented electrical steel by different rolling processes. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, vol. 497, 165975. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165975>
- [17] Hai-Tao Liu, Yin-Ping Wang, Ling-Zi An, et. al. Effects of hot rolled microstructure after twin-roll casting on microstructure, texture and magnetic properties of low silicon non-oriented electrical steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, vol. 420, pp. 192–203. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.07.034>

Yang Jun — Student, Department of Materials Science, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Pakhomova S.A., Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Department of Material Science, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation. E-mail: pahomo@bmstu.ru, SPIN code 7042-6638.

Please cite this article in English as:

Yang Jun. Laser surfacing of the Fe-Si system electrical steel. *Politekhicheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2023, no. 09 (86). (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-9-932>