

УДК 621

## СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ В СТАЛИ 309LSI, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ

**Аносов М.С., к.т.н, доцент**

**Чернигин М.А., аспирант, инженер**

**Мордовина Ю.С., аспирант, ассистент**

Научный руководитель: Аносов М.С., к.т.н, доцент

Нижегородский государственный технический университет имени  
Р.Е.Алексеева

г. Нижний Новгород

### **Аннотация**

Современная промышленность активно ищет возможности снижения себестоимости производства, вследствие этого, одним из направлений, получающих активное развитие, являются аддитивные технологии. В данной работе проводилось исследование влияния термической обработки на структуру стали 309LSI, полученной методом электродуговой наплавки. Рассмотрена структура металла непосредственно после наплавки и после закалки при различных температурах (1100 °C и 1150 °C). С точки зрения возможных физико-химических и механических свойств наиболее благоприятной может быть структура после закалки при температуре 1150 °C.

### **Ключевые слова:**

### **Введение**

Современная промышленность стремится к максимальному снижению производственных издержек, что приводит к интенсификации развития новых способов получения изделий и их заготовок. Одним из направлений, получающих активное развитие на данный момент, являются аддитивные технологии, т.к. помимо максимальной автоматизации производственного процесса, они открывают возможность значительного снижения себестоимости производства за счет снижения количества потребляемого

сырья и минимума технологических операций. Данный эффект проявляется особенно сильно для не серийных и мелкосерийных изделий [1-3].

Основными методами аддитивной наплавки металлов, известных на данный момент, являются: послойное сплавление порошка (SLM), лазерная наплавка порошка (LENS/DMD) и электродуговая наплавка (WAAM) [4]. Наиболее производительным, простым и знакомым для отечественного производства является метод электродуговой наплавки, рассматриваемый в данной работе [5,6].

Аустенитные стали известны комплексом физико-химических свойств, сочетающим высокую коррозионную стойкость в различных средах и парамагнитность. Данные свойства обеспечиваются не только за счет системы легирования, но и однородной аустенитной структуры [7].

Целью данного исследования являлось изучение влияние различных режимов термообработки на структуру стали 309LSI.

### Методики и материалы

Образцы для исследования наплавленного металла изготавливались на специализированном стенде для аддитивной электродуговой наплавки [8]. Наплавка осуществлялась по следующему режиму: I=120 A, U= 24 V, V= 350 мм/мин. В качестве защитной атмосферы применялась смесь Ar - 98% и CO<sub>2</sub> - 2%. В процессе наплавки были изготовлены заготовки в виде стенок. Образцы для металлографических исследований вырезались при помощи гидроабразивной резки. В качестве исходного материала при наплавке применялась сварочная проволока марки ER309LSI. Химический состав исследуемого материала после электродуговой наплавки представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав наплавленного металла

Исследуемый материал	Содержание химических элементов, %								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	S	P
309LSI	0,018	0,820	1,75	23,2	13,4	0,036	0	0,005	0,011

Металлографические исследования проводились в поперечном сечении относительно направления наплавки при увеличениях ×200. Приготовление шлифов осуществлялось по стандартной методике при помощи механического шлифования наждачной бумагой различной зернистости и полирования с использованием паст. В качестве реактива при химическом травлении применялся раствор, состоящий из 5 см<sup>3</sup> HNO<sup>3</sup>, 50 см<sup>3</sup> HCl, и 50 см<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O.

В качестве вариантов ТО применялись закалки по следующим режимам:

1. Режим 1 – температура 1100 °C, выдержка 1 час, охлаждение на воздухе.
2. Режим 2 – температура 1150 °C, выдержка 1 час, охлаждение на воздухе.

### Результаты испытаний и их обсуждение

В ходе металлографического анализа образцов были получены следующие микроструктуры (рисунок 1-3).

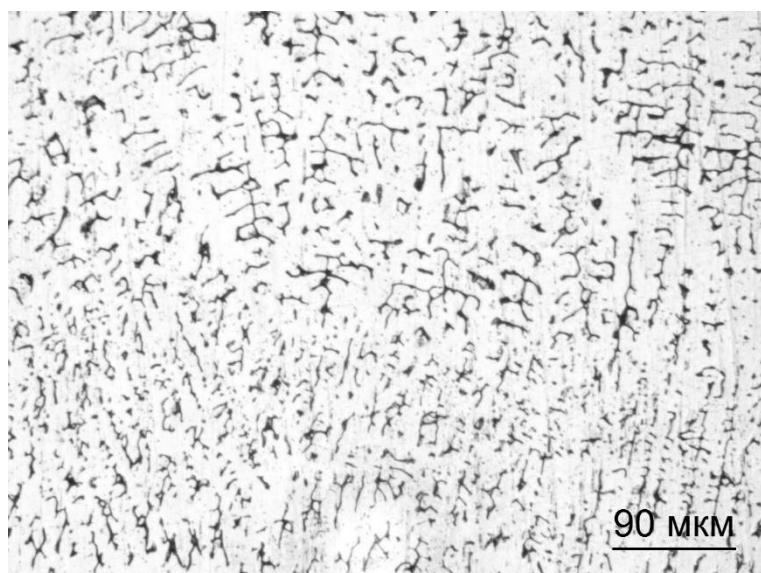


Рисунок 1 – Микроструктура наплавленного металла, ×200

Структура образца после наплавки (рисунок 1) представлена грубыми дендритами, сонаправленными с направлением теплоотвода при наплавке металла. На поверхности наплавочного валика выявляется измельчение дендритной структуры, что может быть объяснено подведением дополнительного тепла при наплавке следующего слоя. В целом, морфология дендритных составляющих преимущественно скелетная и вермикулярная.

В исследованиях, проводимых с использованием сталей AISI 316L [9] и AISI 316 [10], после наплавки происходит образование схожей структуры и отмечается, что дендриты могут состоять из δ-феррита и σ-фазы [9]. Междендритное пространство заполнено γ-фазой (аустенитом).

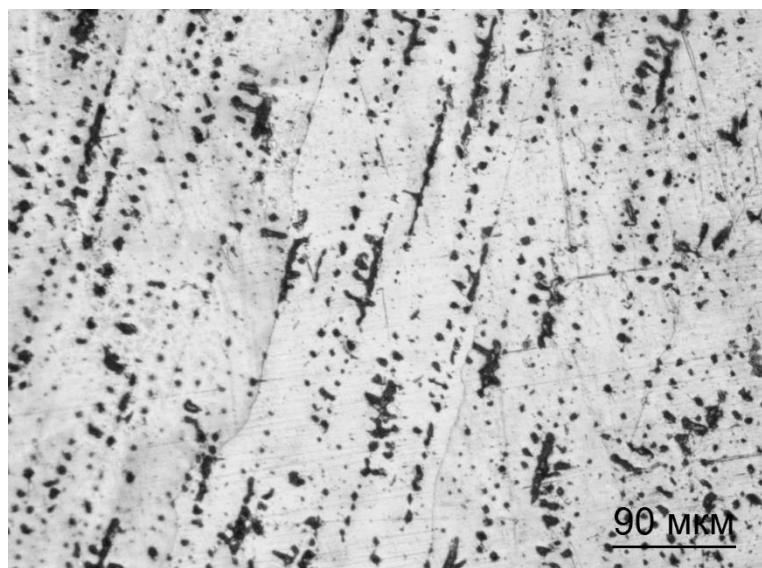


Рисунок 2 – Микроструктура металла после ТО по 1 режиму, ×200

В процессе аустенитизации при 1100 °C происходит частичное растворение дендритной составляющей (рисунок 2). Наблюдается сфероидизация дендритов, но общая направленность структуры сохраняется. Процентное содержание δ-феррита и σ-фазы после данной обработки должно снижаться относительно наплавленного состояния.

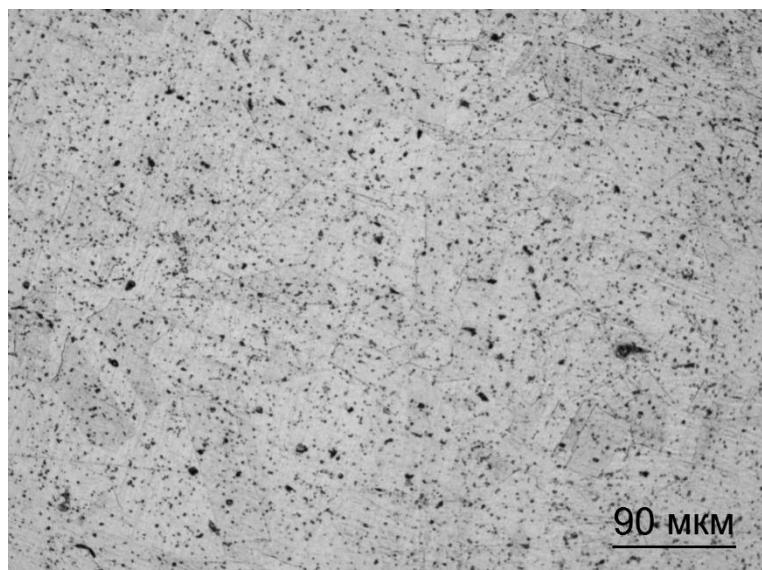


Рисунок 3 – Микроструктура металла после ТО по 2 режиму, ×200

После аустенитизации при температуре 1150 °C в микроструктуре металла начинают отчетливо выявляться аустенитные зерна с характерными для них двойниками (рисунок 3). Дендритные ветви, образовавшиеся в процессе наплавки, практически полностью растворились, оставшиеся дендритные составляющие представлены в виде мелких сфероидизированных включений. Микроструктура после данной ТО может обладать наиболее благоприятным комплексом физико-химических и механических свойств.

## Выводы

В процессе наплавки металла методом WAAM в стали 309LSI происходит образование грубых дендритных составляющих, которые могут состоять из  $\delta$ -феррита и  $\sigma$ -фазы. Преимущественная морфология дендритов скелетная и вермикулярная.

В ходе ТО по режиму 1 (1100 °C, охлаждение на воздухе), происходит частичное растворение дендритных составляющих, однако общая направленность структуры остается нормальной по отношению к поверхности наплавочного слоя.

С точки зрения возможных физико-химических и механических свойств, наиболее перспективным вариантом ТО может быть выбрана аустенитизация по режиму 2 (1150 °C, охлаждение на воздухе), т.к. она обеспечивает наиболее полное растворение дендритных составляющих.

*Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-79-00095 «Разработка научно-технологических основ структурообразования конструкционных материалов полученных путем аддитивного электродугового выращивания для формирования механических свойств при усталости с использованием подходов искусственного интеллекта»*

## Список литературы:

1. Осколков А.А. Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий / А.А.Осколков [и др.] Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20. – № 3. – с. 90-105. DOI:10.15593/2224-9877/2018.3.11
2. Cunningham C.R. Cost modelling and sensitivity analysis of wire and arc additive manufacturing / Cunningham C.R. et al. Procedia Manufacturing. – 2017. – Vol. 11. – P. 650-657. DOI:10.1016/j.promfg.2017.07.163
3. Pant H. Applications of wire arc additive manufacturing (WAAM) for aerospace component manufacturing / Pant H. et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 127. – P. 4995–5011. DOI: 10.1007/s00170-023-11623-7
4. Johnnieew Zhong Li. Review of Wire Arc Additive Manufacturing for 3D Metal Printing / Johnnieew Zhong Li et al. International Journal of Automation Technology. – 2019. – Vol. 13. – No. 3. – P. 346-353. DOI:10.20965/ijat.2019.p0346
5. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests The International

Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 81. – P. 465–481.  
DOI:10.1007/s00170-015-7077-3

6. Wu B. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement / Wu B. et al. Journal of Manufacturing Processes. – 2018. – Vol. 35. – P. 127–139. DOI:10.1016/j.jmapro.2018.08.001

7. Сорокина С.А., Воробьев Р.А., Горшунов М.Г., Чернигин М.А. Опыт использования хромомарганцевой коррозионно-стойкой стали для эксплуатации в системе горячего водоснабжения (ГВС) // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2023. – №. 3 (813). – с. 32-39. DOI:10.30906/mitom.2023.3.32-39

8. Кабалдин Ю.Г. Диагностика процесса 3D-печати на станке с ЧПУ с использованием подходов машинного обучения / Ю.Г.Кабалдин [и др.] Вестник машиностроения. – 2021. – Т.41. № 4. – с. 320-324. DOI:10.36652/0042-4633-2021-1-55-59

9. Chen X. Microstructure and mechanical properties of the austenitic stainless steel 316L fabricated by gas metal arc additive manufacturing / Chen X. et al. Mater. Sci. Eng. A. – 2017. – Vol. 703. – P. 567–577. DOI:10.1016/j.msea.2017.05.024

10. Gürol, U., Kocaman, E., Dilibal, S., Koçak, M. A comparative study on the microstructure, mechanical properties, wear and corrosion behaviors of SS 316 austenitic stainless steels manufactured by casting and WAAM technologies // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2023. – Vol. 47. – P. 215-227 DOI:10.1016/j.cirpj.2023.10.005