

**Ольга Александровна Куприянова<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

\**olganikitenko@list.ru*

## ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КРИОГЕННОЙ НИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ ДЛЯ РЕЗЕРВУАРОВ И ХРАНИЛИЩ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Разработаны химический состав и опытно-промышленная технология производства легированной никелем конструкционной стали повышенной хладостойкости для перспективных резервуаров и хранилищ сжиженного природного газа с рабочей температурой  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Исследована микроструктура и свойства низкоуглеродистой криогенной никелевой стали после одинарной и двойной закалки. Показано, что величина ударной вязкости при криогенных температурах растет с увеличением доли аустенита в микроструктуре после двойной закалки.

*Ключевые слова:* низкоуглеродистая криогенная никелевая сталь, химический состав, термическая обработка, структура, механические свойства.

***Olga A. Kupriyanova***

## EAT TREATMENT, STRUCTURE AND PROPERTIES OF CRYOGENIC NICKEL STEEL FOR LIQUEFIED NATURAL GAS TANKS AND STORAGES

The chemical composition and experimental industrial technology of production of nickel-alloyed structural steel of increased cold resistance for promising tanks and storage facilities of liquefied natural gas with operating temperature  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  have been developed. The microstructure and properties of low-carbon cryogenic nickel steel after single and double quenching were investigated. The impact strength at cryogenic temperatures has been shown to increase with the proportion of austenite in the microstructure after double quenching.

*Key words:* low-carbon cryogenic nickel steel, chemical composition, heat treatment, structure, mechanical properties.

Одной из стратегических задач развития современной промышленности в России является развитие производства и увеличение доли экспорта сжиженного природного газа в Арктических регионах Российской Федерации [1, 2]. Все это предопределяет создание и развитие технологий обработки новых материалов со сложным комплексом свойств, работающие при предельно низких критических температурах [3]. Однако оптимальные свойства и структура могут быть получены только при правильно

подобранной термической обработке [4, 5], что определило цель настоящей работы.

В качестве материала для исследования была выбрана конструкционная криогенная сталь марки 0Н9А (9 % Ni) [6], широко применяемая при создании резервуаров, используемые для хранения сжиженного природного газа. Выплавку слитков, горячую прокатку и термообработку проводили с использованием лабораторного оборудования комплекса ООО «ИЦ Термодеформ-МГТУ».

Термическую обработку проводили по различным режимам:

1. Однократная закалка с 830 °С из однофазной аустенитной области с охлаждением в воде, последующего высокого отпуска при температурах 500 °С, 550 °С, 600 °С. 2. Двойная закалка – первая из однофазной аустенитной области при температуре нагрева 830°С, вторая из межкритического интервала ( $A_{c1}$ -  $A_{c3}$ ) при температуре нагрева 670 °С с целью измельчения микроструктуры и стабилизации остаточного аустенита, далее высокий отпуск при температурах 500 °С, 550 °С, 600 °С.

Комплекс металлографических исследований проводился в ЦКП НИИ "Наносталей". Дифференциально-сканирующая калориметрия проводилась на приборе синхронного термического анализа STA (Jupiter 449 F3) фирмы «NETZSCH». Количество остаточного аустенита определяли на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000.

Определены критические точки исследуемой криогенной стали, которые оказались снижены по сравнению с традиционными углеродистыми сталями и составляют:  $A_{c1} \approx 624$  °С и  $A_{c3} \approx 720$  °С. Установлено, что после двойной закалки происходит обогащение аустенита легирующими элементами, что вызывает дополнительное понижение точки  $A_{c1}$  на 20 °С.

Выявлено, что после одинарной закалки и последующего отпуска в исследуемом диапазоне температур формируется структура, состоящая из мартенсита отпуска, аустенита остаточного,  $\alpha$  – фазы и карбидных частиц, выделяющихся преимущественно по границам зерен, что приводит к охрупчиванию стали. После двойной закалки и последующего отпуска в указанном диапазоне температур формируется дисперсная пластинчатая дуплексная структура, состоящая из  $\alpha$  – фазы, реек «нового» мартенсита, участков со структурой отпущенного мартенсита и остаточного стабильного аустенита с объемной долей около 4 %, что позволяет обеспечить сопротивление разрушению при криогенных температурах по вязкому механизму [6, 7].

Использование полученных результатов новых научных данных позволит создавать и совершенствовать технологические режимы термической обработки сплавов указанного состава [8–10].

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Горынин И. В. Проблемы морской транспортировки сжиженного природного газа: Материалы для танков судов-газовозов / И. В. Горынин, Ю. Л. Легостаев, Е. П. Осокин // Судостроение. 2009. № 5. С. 32-40.
2. Poletskov P. P. Development of alloyed pipe steel composition for oil and gas production in the Arctic region / Poletskov P. P. [etc.] // Resources. 2019. V. 8. № 2. P. 67.
3. Матросов М. Ю. Разработка перспективных образцов криогенных сталей для газовозов и стационарных танков-хранилищ сжиженного природного газа, предназначенных для использования в условиях Арктики / М. Ю. Матросов [и др.] // Арктика: экология и экономика. 2016. № 4 (24). С. 80–89.
4. Полецков П. П. Исследование влияния многостадийной термической обработки на особенности формирования микроструктуры криогенной конструкционной стали / П. П. Полецков [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2018. Т. 16. № 2. С. 29–40.
5. Poletskov P. P. Research of the heat treatment effect on the microstructure and properties of cryogenic steel used to transport and store liquefied gases in the arctic region of Russia / P. P. Poletskov [etc.] // В сборнике: Функциональные материалы: прогнозирование свойств и технологии изготовления. Материалы международной научно-технической конференции. 2019. С. 67.
6. Poletskov P. P. On microstructure formation features of 9 % nickel cold-resistant steel and its properties brought about by different heating treatment procedures / P. P. Poletskov [etc.] // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2018. V. 53. № 5. P. 967–976.
7. Lu Y. Q. Investigation on Mechanical Behaviors of Cold Stretched and Cryogenic Stretched Austenitic Stainless Steel Pressure Vessels / Y. Q. Lu, H. Hui // Procedia Engineering. 2015. V. 130. P. 628–637.
8. Способ производства листов из криогенной конструкционной стали: пат. 2703008 Рос. Федерации: МПК С1 С21D 8/02, С22С 38/08, В21В 1/26 / Полецков П.П., Гущина М.С., Алексеев Д.Ю., Никитенко О.А., Денисов С.В., Брайчев Е.В., Стеканов П.А.; заявитель и патентообладатель Публичное акционерное общество «Магнитогорский металлургический комбинат» № 2019120118; заявл. 26.06.2019; опубл. 15.10.2019.
9. ASTM A553/A553M/ Standard Specification for Pressure Vessel Plates Alloy Steel Quenched and Tempered 7, 8 and 9% Ni // STANDARD by ASTM International. 2014.
10. EN 10028-4 Прокат плоский стальной для работы под давлением. Технические условия. Часть 4. Никелевая легированная сталь с заданными свойствами при низких температурах.

## REFERENCES

1. Gorynin I. V. Problems of sea transportation of liquefied natural gas: Materials for tanks of gas carriers / I.V. Gorynin, Yu. L. Legostaev, E. P. Osokin // Shipbuilding. 2009. №. 5. P. 32–40.
2. Poletskov P. P. Development of alloyed pipe steel composition for oil and gas production in the Arctic region / P. P. Poletskov [et al.] // Resources. 2019. V. 8. №. 2. P. 67.
3. Matrosov M. Yu. Development of Promising Samples of Cryogenic Steels for Gas Carriers and Stationary Liquefied Natural Gas Storage Tanks Intended for Use in the Arctic / M. Yu. Matrosov [et al.] // Arctic: Ecology and Economics. 2016. № 4 (24). P. 80–89.
4. Poletskov P. P. Study of the effect of multi-stage thermal treatment on the features of the formation of the microstructure of cryogenic structural steel / P. P. Poletskov [et al.] // Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov. 2018. V. 16. №. 2. P. 29–40.
5. Poletskov P. R. Research of the heat treatment effect on the microstructure and properties of cryogenic steel used to transport and store liquefied gases in the arctic region of Russia / P. P. Poletskov [et al.] // In the collection: Functional materials: prediction of properties and manufacturing technology. Materials of the international scientific and technical conference. 2019. P. 67.
6. Poletskov P. P. On microstructure formation features of 9 % nickel cold-resistant steel and its properties brought about by different heating treatment procedures / P. P. Poletskov [et al.] // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2018. V. 53. №. 5. P. 967–976.
7. Lu Y. Q. Investigation on Mechanical Behaviors of Cold Stretched and Cryogenic Stretched Austenitic Stainless Steel Pressure Vessels / Y. Q. Lu, H. Hui // Procedia Engineering. 2015. V. 130. P. 628–637.
8. Method of production of sheets of cryogenic structural steel: pat. 2703008 Ros. Federations: IPC C1 C21D 8/02, C22C 38/08, B21B 1/26 / Poletskov P.P., Gushchina M.S., Alekseev D.Yu., Nikitenko O.A., Denisov S.V., Braichev E.V., Stekanov P.A.; applicant and patent holder Public Joint Stock Company Magnitogorsk Iron and Steel Works No. 2019120118; application 26.06.2019; publ. 15.10.2019.
9. ASTM A553/A553M/ Standard Specification for Pressure Vessel Plates Alloy Steel Quenched and Tempered 7, 8 and 9% Ni // STANDARD by ASTM International. 2014.
10. EN 10028-4 Flat steel rolled products for working under pressure. Technical conditions. Part 4. Nickel alloy steel with specified properties at low temperatures.