

Н. Г. ЕФИМЕНКО, С. В. АРТЁМОВА, А. Н. РОЖНОВ, В. В. ПЕНЗЕВ

СТРУКТУРА И МЕХАНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ СВАРКИ ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ

Приведен анализ литейных дефектов в корпусных деталях энергооборудования, способы их устранения. Установлены и проанализированы направления разработок зарубежных исследователей в области сварки теплоустойчивых сталей. Показана перспективность применения перлитного материала при электродуговой заварке дефектов. Приведены результаты исследований сварочного материала перлитной структуры, микролегированного редкоземельными металлами, обладающего высокими сварочно-технологическими, вязкопластическими свойствами и ударной вязкостью.

Ключевые слова: теплоустойчивые стали, холодные трещины, механические свойства, редкоземельные металлы, пластичность, вязкость.

М. Г. ЕФИМЕНКО, С. В. АРТЕМОВА, О. М. РОЖНОВ, В. В. ПЕНЗЕВ

СТРУКТУРА І МЕХАНІКО ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРИСАДОЧНОГО МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ТЕПЛОСТІЙКИХ СТАЛЕЙ

Приведений аналіз ливарних дефектів у корпусних деталях енергообладнання, способи їх усунення. Встановлені і проаналізовані напрямки розробок закордонних дослідників в області зварювання теплостійких сталей. Показана перспективність використання перлітного матеріалу в якості присадки при електродугової заварці дефектів. Приведені результати досліджень зварювального матеріалу з перлітною структурою, мікролегованого рідкісноземельними металами, який характеризується високими зварювально-технологічними, в'язко-пластичними властивостями і ударною в'язкістю.

Ключевые слова: теплотривкі сталі, холодні тріщини, механічні властивості, рідкоземельні метали, пластичність, в'язкість.

N. EFIMENKO, S. ARTEMOVA, A. ROZHNOV, V. PENZEV

STRUCTURE AND MECHANICAL AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF ADDITIVE MATERIAL FOR WELDING HEAT-RESISTANT STEELS

The analysis of casting defects in the hull parts of power equipment, and their elimination methods. The development directions of foreign researchers in the field of heat-resistant steels welding are established and analyzed. The prospects of using pearlite material for electric arc welding of defects is shown. The results of studies of the welding material of a pearlite structure, microalloyed by rare-earth metals, with high welding-technological, viscoplastic properties and impact strength are presented. An analysis of the state of scientific developments of metallurgists, material scientists and welders shows that, to ensure high viscoplastic properties of steel products, a promising direction is the use of rare earth metals as modifiers and microalloying additives as desulfurizers. The welding process is carried out without heating and subsequent heat treatment. For research, an experimental batch of electrodes was manufactured as rods in which the wire SV-08A was used. Doping was provided through an electrode coating. Alloying with rare-earth metals was carried out by introducing yttrium ligature into the coating, it was found that the introduction of rare-earth metals into the deposited metal allows to obtain high visco-plastic properties of the metal without reducing the carbon content, which, in turn, provides strength properties at the level specified by regulatory documentation.

Key words: heat-resistant steels, cold cracks, mechanical properties, rare-earth metals, ductility, toughness.

Введение

Основным способом при ремонте элементов энергетического оборудования является ручная электродуговая сварка покрытым электродам. На сегодняшний день рекомендуется различные технологии ремонта [1, 2]. Применяются два вида сварочного материала по структурному классу – аустенитный и перлитный.

К элементам оборудования, которые чаще всего подвержены ремонту по причине выявления дефектов на стадии изготовления или процессе работы на готовых изделиях, относятся литые корпуса турбин, цилиндры высокого давления, низкого и среднего давления, стопорные регулирующие клапана и др. Выявляемые дефекты чаще всего литейные: раковины, рыхлоты, земляные засоры, скопление пористости. В меньшей мере встречаются дефекты технологического или эксплуатационного характера (трещины). Обычно

выборки единичных дефектов для заварки на толстостенных деталях в ряде случаев достигают 2–5 тыс. см³ (рис. 1). Для их исправления расходуется в среднем от 10 до 50 кг сварочных электродов.

Многолетним накопленным опытом установлено, что наиболее перспективным при сварке низколегированных закаливающихся сталей является применение сварочных материалов, обеспечивающих соединения равнопрочные основному металлу. При сварке жаропрочных сталей структурный класс таких материалов также должен быть перлитный. Вместе с тем при сварке перлитными материалами в высокотемпературной области зоны термического влияния (ЗТВ) образуются закалочные структуры, приводящие к образованию холодных трещин (ХТ). Присутствующей в металле диффузионный водород сверх установленного допустимого уровня (>5–6 см³/100г) усугубляет процесс охрупчивания металла сварного

соединения. Основным способом предупреждения ХТ является подогрев свариваемого металла до температуры 300–400 °С. Из зарубежной практики известно, что одним из основных направлений по сварке закаливающихся сталей, используемых в теплоэнергетике, является применение сварочных материалов с повышенной пластичностью и ударной вязкостью. Так, в Японии для сварки хромо-молибденовых теплостойких сталей применяют электроды марки СМВ-95 [3] с высоким уровнем пластичности и низким содержанием водорода. При этом для сохранения жаропрочности соединения углерод находится в пределах 0,08...0,12 %. В США для подобных целей применяют стали с содержанием углерода в пределах 0,25 % (стали WCA, WC1), но также с высокими показателями пластичности [4]. Высокие пластические свойства и ударная вязкость достигаются за счет повышения чистоты основного металла по сере ($\leq 0,01$ %) и фосфору.

В России учеными всесоюзного теплотехнического института (ВТИ) разработана марка электродов ТМЛ-3, которая рекомендована и используется для сварки, в том числе и для заварки дефектов на теплоустойчивых хромо-молибденовых и хромо-молибденованадиевых сталях. Однако наиболее предпочтительными являются разработанные этим же институтом низкоуглеродистые низколегированные перлитные электроды марок ТМЛ-4В и ТМЛ-5 [4], особенностью которых является низкое содержание углерода ($\sim 0,06$ %). Снижение содержания углерода в наплавленном металле обеспечивается за счет уменьшения соотношения компонентов в покрытии $\text{CaCO}_3/\text{CaF}_2$, а также применения в качестве стержня сварочной проволоки, содержащей 0,04 % С (СВ-04А). Однако изменение в составе покрытия электродов приводит к ухудшению технологических свойств [4] при плавлении.

Анализ состояния научных разработок металлургов, материаловедов-сварщиков показывает, что для обеспечения высоких вязкопластических свойств стальной продукции перспективным направлением является использование в качестве десульфураторов, модификаторов и микролегирующих добавок редкоземельных металлов (РЗМ). В США для нейтрализации серы в углеродистой стали используют цериевый мишметалл [5], что обеспечивает повышение на 15–25 % пластичной и ударной вязкости. Добавки РЗМ в металл сварных швов [5–8] изменяет форму, размер и степень распределения неметаллических включений (НВ), измельчает структуру. Так, в работе [6] представлен механизм десульфурации металла при электродуговой сварке: в предкристаллизационный период существования жидкой ванны РЗМ, перешедшие из сварочного материала (электрода) в ванну, образуют мелкодисперсные сложные по

химическому составу соединения типа $\text{P}_3\text{M}_2\text{S}_3$, P_3MOS и др., равномерно распределенные в матрице. Происходит нейтрализация легкоплавкой жидкой фазы, пересыщенной серой, путем перевода ее в тугоплавкие соединения. Границы зерен и растущих при охлаждении кристаллитов очищаются от легкоплавкой примеси. Очищение пограничных участков приводит к повышению электронных межкристаллических связей. В результате в углеродистом наплавленном металле обеспечивается повышение вязко-пластических свойств: δ в 1,8 раза; ψ в 2,5 раза; KCV_{+20} в 1,7 раза.

Цель работы

Целью работы является исследование механико-технологических свойств и структуры металла, наплавленного электродами, содержащими РЗМ. Процесс сварки осуществляется без подогрева и последующий термической обработки.

Материалы и методика проведения исследований

Для исследований была изготовлена опытная партия электродов в качестве стержней, в которых использовалась проволока СВ-08А. Легирование обеспечивалось через электродное покрытие. Легирование РЗМ осуществлялось путем ввода в покрытие иттриевой лигатуры С30РЗЭ10 (ТУ 14-141-91) в количестве 10 %. Соотношение $\text{CaCO}_3/\text{CaF}_2$ выдерживалось в пределах 1:(0,35–0,4). Подготовка образцов для исследования осуществлялась в соответствии требованиям и стандартов. Структурные исследования проводились с использованием оптической и электронной микроскопии. Химический состав определяли методом спектроскопии. Механические свойства наплавленного металла и химический состав приведены в табл. 1. Экспериментальным электродам присвоена марка УНЛ-1.

Сравнительная информация о экспериментальных электродах УНЛ и применяемых на предприятиях отрасли ТМЛ-3, а также рекомендуемых ТМЛ-4 и ТМЛ-5 [4] приведены в табл. 1.

Обсуждение результатов исследований

Установлено, что введение в состав покрытия электродов РЗМ обеспечивает высокую стабильность горения дуги с минимальным разбрызгиванием расплавленного металла. Микроструктурный анализ показал, что в наплавленном металле микролегированным РЗМ, при сварочных скоростях охлаждения (10–12 °/с) подавляется перлитное превращение, формируется структура бейнитного типа, преимущественно это зернистый бейнит с незначительным содержанием (небольшим коли-

чеством) ферритной фазы (рис. 1б). Структура мелкозернистая. Размер зерна исходного варианта металла по шкале ГОСТ 5639-82 соответствует 7–8 баллу; микролегированного металла ~9–10 балла.

В структуре наряду с массивными зернами присутствуют мелкие зерна и субзерна, располагающиеся как по границам крупных, так и внутри таковых (рис. 2).

Таблица 1 – Химический состав и механические свойства наплавленного металла

| Варианты | Химический состав, % мас. | | | | | | | | Механические свойства | | | | |
|----------|---------------------------|------|-----|-----|------|----------|-------|-------|-----------------------|------------------|--------------|------------|-------------------------|
| | C | Si | Mn | Cr | Mo | S | P | РЗМ | σ_b , МПа | σ_2 , МПа | δ , % | ψ , % | KCV, Дж/см ² |
| | | | | | | не более | | | | | | | |
| без РЗМ | 0,08...0,12 | 0,38 | 0,8 | 1,1 | 0,6 | 0,025 | 0,035 | — | 590 | 410 | 19 | 60 | 89 |
| УНЛ-1 | 0,08...0,12 | 0,38 | 0,8 | 1,1 | 0,7 | 0,012 | 0,018 | 0,009 | 590 | 420 | 26 | 70 | 128 |
| ТМЛ-3* | 0,08...0,12 | 0,35 | 0,8 | 1 | 0,65 | 0,025 | 0,035 | — | 470 | 420 | 18 | 58 | 88 |
| ТМЛ-4В* | 0,04...0,07 | 0,35 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,02 | 0,02 | — | 580 | — | 15 | 60 | 100 |
| ТМЛ-5* | 0,065 | 0,35 | 0,6 | 0,7 | 0,75 | 0,25 | 0,025 | — | 560 | — | 18 | — | 88 |

* по данным [4].

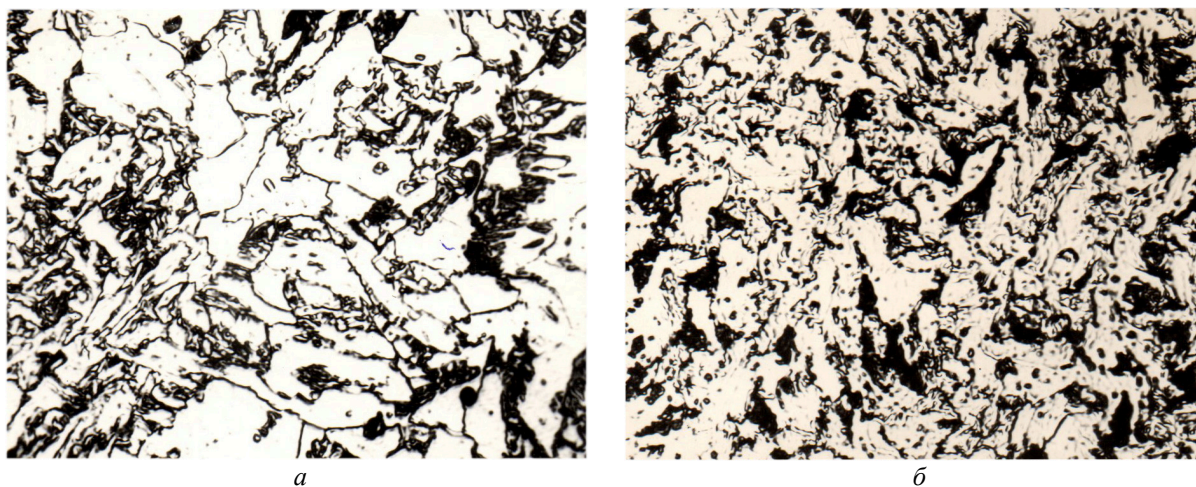


Рис. 1 – Микроструктура зернистого бейнита наплавленного металла (x800):
а – исходный вариант; б – содержащий 0,009 % РЗМ

Таким образом, введение в наплавленный металл редкоземельных металлов (остаточное содержание 0,009 %) оказывает благоприятное воздействие на пластические свойства и структуру: относительное удлинение (δ) повышается на ~40 % (с 18 % до 26 %); относительное сужение (ψ) на ~12 % (с 60 % до 70 %); ударная вязкость (KCV₂₀) на ~40 % (с 89 Дж/см² до 128 Дж/см²). Модифицирующий эффект проявился в дроблении зеренной структуры: размер зерна уменьшился (с 7–8 балла до 9–10 балла). Такое изменение структуры и пластических свойств наплавленного металла под воздействием РЗМ позволяет сохранить содержание углерода (0,1–0,12 %) на прежнем уровне, что в свою очередь обеспечивает требуемые прочностные свойства.

Сварочный материал (электрод УНЛ-1) рекомендуется для применения при исправлении дефектов на литых корпусных деталях, изготовленных из теплоустойчивых хромомолибденовых и хромомолибденованадиевых сталей.



Рис. 2 – Электронно-микроскопический снимок структуры наплавленного металла, содержащего 0,009 % РЗМ (x15000)

Выводы

Установлено что, введение в наплавленный металл РЗМ (остаточное содержание 0,009 %) позволяет получить высокие вязко-пластические

свойства металла без снижения содержания углерода, что, в свою очередь обеспечивает прочностные свойства на уровне, оговоренном нормативной документацией.

Список литературы

1. Панов В. И. Универсальная методика ремонтной сварки крупногабаритных массивных конструкций тяжелого машиностроения. *Сварочное производство*. 2007. С. 11–17.
2. Назарчук А. Т., Снисарь В. В., Демченко Э. Л. Получение равнопрочных сварных соединений закаляющихся сталей без подогрева и термической обработки. *Автомат. сварка*. 2003. № 5. С. 41–46.
3. *Cobe steel welding consumables*. Catalog-Tokio. 1978. 103 p.
4. Анохов А. Е., Корольков П. М. *Сварка и термическая обработка корпусного энергетического оборудования при ремонте*. Киев: Экотехнология, 2003. 87 с.
5. Иоситэцу Н. *Newer. Metal, Ind.* 1971. Vol. 16. № 5. С. 107–110.
6. Ефименко Н. Г. *Редкоземельные металлы в сварочных материалах*. Харьков: ПФ. Коллегиум, 2017. 187 с. ISBN 978-966-97418-9-9.
7. Рычков А. П., Ланская К. А., Тюрин Е. И. Влияние РЗМ на структуру и свойства котельных сталей 20К и 12Х1МФ. *Сталь*. 1973. № 10. С. 930–932.
8. Накао Е., Нисимото К. Охрупчивание наплавленного металла в сварных швах высококачистой хромомолибденовой (19Cr–2Mo) стали и его уменьшение путем введения добавок редкоземельных. *Есэцу гакэй ромбунсю*. 1984. Т. 2, № 2. С. 325–331.

References (transliterated)

1. Panov V. I. (2007), “Universal'naja metodika remontnoj svarki krupnogabaritnyh massivnyh konstrukcij tjazhelogo mashinostroenija [A universal technique for repair welding of large-sized massive structures of heavy engineering]”, *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding production], pp. 11–17.
2. Nazarchuk A. T., Snisar V. V., Demchenko E. L. (2003), “Poluchenie ravnoprochnykh svarnykh soedinenij zakalivayushihysya stalej bez podogreva i termicheskoj obrabotki [Obtaining equal strength welded joints of hardened steels without heating and heat treatment]”, *Avtomat. svarka* [Automatic Welding]. no. 5., pp. 41–46.
3. (1978), *Cobe steel welding consumables, Catalog-Tokyo* [Catalog-Tokyo], 103 p.
4. Anahov A. E., Korolkov P. M. (2003), *Svarka i termicheskaya obrabotka korpusnogo energeticheskogo oborudovaniya pri remonte* [Welding and heat treatment of case power equipment during repair.], *Ekotehnologiya* [Ecotechnology], Kiev, 87 p.
5. Iositecu N. (1971), *Newer. Metal, Ind.* vol. 16, no. 5. pp. 107–110.
6. Efimenko N. G. (2017), *Redkozemelnye metally v svarochnykh materialah* [Rare earth metals in welding consumables], PF. Collegium, Kharkiv, 187 p, ISBN 978-966-97418-9-9.
7. Rychkov A. P., Lanskaya K. A., Tyurin E. I. (1973), “Vliyanie RZM na strukturu i svojstva kotelnykh stalej 20K i 12H1MF [The influence of rare-earth metals on the structure and properties of boiler steels 20K and 12Kh1MF]”, *Stal* [Steel], no. 10, pp. 930–932.
8. Nakao E., Nisimoto K. (1984), “Ohrupchivanie naplavlennogo metalla v svarnykh shvah vysokochistoj hromomolibdenovoj (19Cr–2Mo) stali i ego umenshenie putem vvedeniya dobavok redkozemelnykh [Embrittlement of deposited metal in welds of high-purity chromium-molybdenum (19Cr – 2Mo) steel and its reduction by introducing rare-earth additives]”, *Eseku gakai rombunshu* [Yessetsu gakai rhombunshu], no. 2, pp. 325–331.

Поступила (received) 08.11.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ефименко Микола Григорович (Ефименко Николай Григорьевич, Efimenko Mikola) – доктор технічних наук, професор кафедри зварювання; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел. м. 050-225-66-03.

Артемова Світлана Віталіївна (Артемова Светлана Витальевна, Artemova Svetlana) – начальник ЦЗЛ, ОА «Турбоатом», тел. м. 067-501-16-63.

Рожнов Олександр Миколайович (Рожнов Александр Николаевич, Rozhnov Oleksandr) – студент, кафедра зварювання; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел. м. 066-574-11-50; e-mail: LexRozhnov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7960-1030>.

Пензев Владислав Валерійович (Пензев Владислав Валерьевич, Penzev Vladislav) – студент, кафедра зварювання; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел. м. 066-672-61-19, e-mail: penzev98@ukr.net