

УДК 621.74.042:669.187.56
DOI: 10.25206/1813-8225-2018-159-5-9

Е. Н. ЕРЕМИН¹
Г. Н. МИННЕХАНОВ²
Р. Г. МИННЕХАНОВ²

¹Омский государственный
технический университет,
г. Омск

²ООО «Технологический центр»,
г. Омск

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЛИТОГО МЕТАЛЛА ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ КОМПЛЕКСНЫМ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ ДИСПЕРСНЫМИ ИНОКУЛЯТОРАМИ

Рассмотрена проблема повышения качества стальных отливок деталей трубопроводной арматуры, полученных электрошлаковым литьем. Предложен комплексный подход к подготовке расплава при электрошлаковом литье, включающий его глубокое раскисление добавкой, содержащей редкоземельные металлы, и ввод модифицирующего комплекса, содержащего нанодисперсные частицы пироуглерода, что формирует в структуре мелкодисперсную ферритно-перлитную структуру, с мелкими глобулярными неметаллическими включениями, расположенными в осях дендритов. Такая технология позволяет изготавливать отливки из широкого класса сталей с высоким уровнем хладостойкости.

Ключевые слова: трубопроводная арматура, электрошлаковое литье, нанодисперсные частицы, модифицирование, структура, механические свойства, хладостойкость.

Работа выполнена за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект №16-48-550523).

Введение. На предприятиях нефтехимической и газовой промышленности используется соединительная трубопроводная арматура, работающая в условиях Крайнего Севера. Широкое применение для её изготовления нашел метод электрошлакового литья (ЭШЛ) [1–3]. В то же время по некоторым механическим свойствам и служебным характеристикам полученный литой металл не всегда удовлетворяет требованиям и стандартам, предъявляемым к эксплуатируемым изделиям [4, 5]. Одним из трудновыполнимых показателей качества литых

заготовок являются ударная вязкость КСЧ и КСВ величина вязкой составляющей в структуре металла. Это обусловлено столбчатой крупнозернистой структурой литого металла с большой протяженностью первичных осей дендритов, структурной и химической неоднородностью по всему объему получаемой литой заготовки [5].

С целью повышения эксплуатационной надежности электрошлаковых заготовок используют объемное модифицирование литого металла дисперсными инокуляторами [6]. Обычно в качестве

инокуляторов используют частицы карбидов, нитридов, карбоборидов титана, вольфрама, ниобия, циркония и др. [6–11]. В то же время их широкое использование сдерживается дефицитностью и высокой стоимостью таких соединений. Вместе с тем промышленностью выпускается пироуглерод, который тоже может быть использован в качестве модификатора [12, 13]. Однако применение его в качестве модификатора литого металла не изучено.

В связи с этим в работе исследовали влияние пироуглерода на структуру и свойства отливок из низкоуглеродистой стали, полученных электрошлаковой тигельной плавкой металла.

Объекты и методы исследований. Объектом исследований являлась сталь 20Л. Опытные плавки проводили на установке центробежного электрошлакового литья КТМЭЛ-1 емкостью 250 кг и мощностью 250 кВт/час. В качестве исходного сырья использовали расходные электроды, сваренные из кусков проката в штангу. Во время плавки капли металла, проходя через слой шлака, температура которого обычно на 150–200 °С выше температуры плавления стали, интенсивно рафинируются от вредных примесей и неметаллических включений. После накопления достаточного объема металла по серийной технологии в расплав вводили ферромарганец, ферросилиций, науглероживатель для получения требуемого химического состава и алюминий для раскисления. Окончательное раскисление по опытной технологии выполняли специальной добавкой, содержащей редкоземельные металлы (РЗМ).

Ввод модифицирующего комплекса содержащего пироуглерод для опытных плавок осуществляли в контейнере из стальной трубы, приваренной на штангу. Ввод добавок в контейнере обеспечивал их гарантированное усвоение расплавом, предотвращая от растворения комплекса в шлаке.

После усвоения добавки расплав выпускался в форму, установленную на центробежную машину с вертикальной осью вращения. Отливки

по серийной технологии термообработали по режиму — нормализация (900–920 °С) с последующим высоким отпуском (600–650 °С). Отливки опытных плавок подвергались термообработке по специальному режиму.

Химический состав литого металла и распределение титана по сечению отливки определяли методом спектрального анализа на установке ДФС-500.

Металлографические исследования литого металла проводили на оптическом микроскопе Olympus GX-41.

Механические испытания проводили на универсальной разрывной машине УММ-10. Ударную вязкость образцов определяли на маятниковом копре КН-30.

Для изучения механических, служебных свойств и структуры отливок вырезали кольца.

Результаты и обсуждение. Химический состав исходной и опытных отливок приведены в табл. 1.

Анализ результатов испытаний образцов из металла, полученного по серийной технологии, показал относительно невысокий уровень ударной вязкости при –60 °С и вязкой составляющей в изломе после испытаний с V-образным надрезом (табл. 2).

Характерные особенности излома — большое количество мелких острых элементов, форма которых обусловлена кристаллическим (дендритным) строением металла. В структуре металла наблюдаются дендриты с ветвями второго порядка, расположенные параллельно поверхности, что указывает на неориентированный по нормали рост кристаллов при затвердевании поверхностного слоя отливки.

Содержание феррита, по мере удаления от наружной поверхности отливки, резко снижается, в то время как концентрация углерода повышается, что отражается в увеличении количества перлитной составляющей в структуре. За обогащенным находится обедненный углеродом слой (середина стенки), наличие которого связано с ликвацией углерода. Балл зерна на поверхности составляет 8–9, а в центральной части стенки отливки 5–6.

Таблица 1

Химический состав серийной и опытных отливок

№ плавки	Химический состав, в %									
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Ti	Cu	S	P
Серийная	0,17	0,58	0,35	0,12	0,1	0,16	0,01	0,19	0,011	0,025
Опытная № 1	0,18	0,56	0,33	0,18	0,08	0,17	0,05	0,17	0,012	0,024
Опытная № 2	0,17	0,56	0,38	0,16	0,08	0,15	0,06	0,15	0,011	0,024

Таблица 2

Механические свойства отливок из стали 20, полученных по серийной технологии

№ плавки	σ_B , МПа	σ_m , МПа	δ , %	ψ , %	Ударная вязкость при $t = -60$ °С, Дж/см ²		Вязкая составляющая излома	
					KCU	KCV	KCU, %	KCV, %
4014	545	407	30	54	109	28	43	17
4022	524	384	28	58	121	42	55	33

Механические свойства отливок из модифицированной стали 20

№ плавки	σ_b , МПа	σ_m , МПа	δ , %	ψ , %	Ударная вязкость при $t = -60$ °С, Дж/см ²		Вязкая составляющая излома	
					KCU	KCV	KCU, %	KCV, %
4020	540	375	31	70	195	145	85	60
4021	520	366	31	72	177	104	82	65
4013	508	355	25	74	163	103	85	69

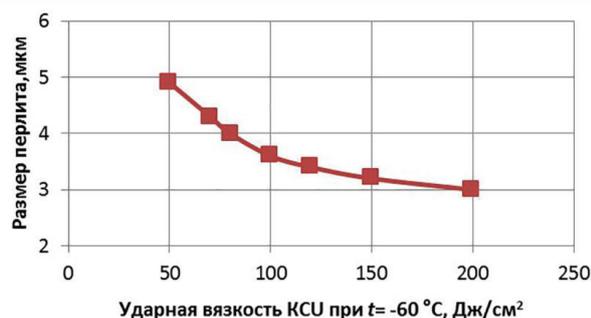


Рис. 1. Влияние размера перлитной составляющей на ударную вязкость KCU отливок из стали 20 ЭШЛ

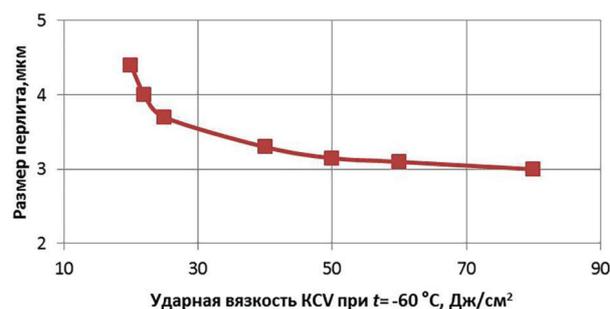


Рис. 2. Влияние размера перлитной составляющей на ударную вязкость KCV отливок из стали 20 ЭШЛ

Зерна феррита частично имеют видманштетовое строение. Такая явно выраженная дифференциация структуры металла по сечению объясняется разными теплофизическими условиями их затвердевания и образованием структурных зон в отливке.

Фрактографические исследования показали загрязненность неметаллическими включениями (НМВ) сульфидной природы исследуемого поверхностного слоя излома. Принято считать, что, располагаясь по границам зерен, сульфидная эвтектика ослабляет междендритные связи, в результате чего в местах ее залегания образуются микропоры, снижающие ударную вязкость [14]. Кроме грубой сульфидной эвтектики, образующейся по границам дендритных кристаллов, в металле наблюдается значительное количество отдельных сульфидов, оксисульфидов и оксидов, расположенных в металлической матрице. Степень влияния НМВ на хрупкость стали зависит от их формы, количества и размера. Считается, что легкие, изолированные НМВ, оказывают незначительное влияние на процессы разрушения стали, а наиболее опасными считаются вытянутые включения или пленки [15]. В серийной отливке обнаружены преимущественно оксисульфидные включения неправильной формы, способствующие охрупчиванию металла.

Пластичность стали характеризуется общей площадью соприкосновения между кристаллами, образующими каркас. Ее повышению способствует мелкодисперсная разветвленная дендритная структура и рассредоточенные по объему неметаллические включения [16]. Обеспечить такую структуру отливки можно за счет использования специальных технологических методов подготовки расплава при литье, способствующих интенсификации зародышеобразования в расплаве в начальный момент затвердевания отливки.

Раскисление расплава РЗМ, ввод в него модифицирующего комплекса и уточненные режимы термообработки позволяют изменить процесс формирования избыточных фаз и неметаллических включений, что обеспечивает получение отливок с повышенной ударной вязкостью при незначительном изменении прочностных свойств (табл. 3).

Сравнительный анализ, полученных данных показал, что модифицирование стали 20 при ЭШЛ обеспечивает повышение ударной вязкости KCU до 160–190 Дж/см² и KCV до 100–140 Дж/см². При этом происходит незначительное снижение предела прочности и предела текучести при сохранении уровня значений относительного удлинения и относительного сужения.

Для отливок из модифицированной стали характерно стабилизация количества вязкой составляющей излома для испытаний KCU на уровне свыше 80 % и для испытаний с острым надрезом на уровне свыше 60 %.

Полученные результаты испытаний ударной вязкости отливок и анализ перлитно-ферритной микроструктуры ударных образцов позволил установить взаимосвязь размера перлитной составляющей и ударной вязкости отливок, полученных методом ЭШЛ (рис. 1, 2).

Как видно, наибольшую ударную вязкость имеет металл в котором размер перлитной составляющей структуры составляет около 3 мкм. Макроструктура такого металла отличается высокой плотностью и однородностью и состоит, как правило, из равноосных кристаллов. Неметаллические включения распределены по сечению отливки равномерно. Они имеют размеры, в основном, не более 2–3 мкм и глобулярную форму. По составу они обычно представляют собой шпинели сложного состава. Шлаковые и другие экзогенные включения не об-

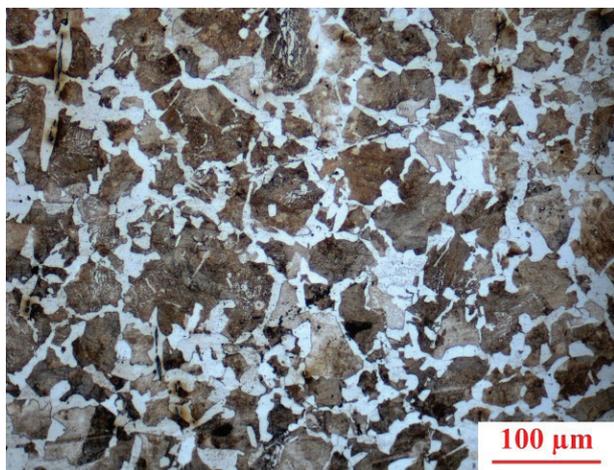


Рис. 3. Микроструктура модифицированной стали

наружены, что подчеркивает минимальную загрязненность такого металла.

При анализе микроструктуры образцов установлено, что модифицирование ультрадисперсными порошками позволяет формировать во всем объеме структуры отливки мелкодисперсную ферритно-перлитную смесь, зерно которой соответствует 7–8-му баллу шкалы ГОСТа, с мелкими глобулярными карбидными включениями, расположенными в осях дендритов (рис. 3).

Большую роль в увеличении энергии, затраченной на разрушение при ударе, играют морфология и топография карбидной фазы. Образование боль-

шого количества компактных карбидов в металле опытных плавок можно объяснить увеличением степени переохлаждения расплава при введении в него модификатора, дисперсные частицы которого, являясь центрами кристаллизации, увеличивают скорость охлаждения металла. Увеличение количества карбидов в металле в результате модифицирования сопровождается увеличением равномерности распределения дислокаций в деформируемом объеме [17]. Модифицирование способствует размножению и перемещению дислокаций и стимуляции фазовых превращений, повышает величину сил межатомных связей и прочность сцепления карбидов с матрицей [18].

Проведенный микроанализ показал, что в модифицированном металле, в сравнении с немодифицированным, легирующие элементы распределены намного равномернее, а величина дендритной ликвации существенно снижается.

Благодаря связыванию легирующих элементов, взаимодействующих с углеродом, повышается химическая стабильность матрицы и оказывается благоприятное воздействие на механические свойства получаемых отливок.

Разработанная технология была опробована при изготовлении отливок из низкоуглеродистых низколегированных сталей. Установлено, что механические свойства модифицированного металла существенно превосходят свойства металла отливок, полученных по серийной технологии (табл. 4, 5).

Важной особенностью модифицированного металла, выгодно отличающей его от немодифицированного, является изотропность свойств в различных направлениях.

Таблица 4

Механические свойства металла отливок из низкоуглеродистых сталей, изготовленных по серийной технологии

Сталь	Механические свойства				
	σ_b , МПа	σ_m , МПа	δ , %	ψ , %	KCV при $t = -60$ °С, Дж/см ²
09Г2СЛ	519	370	30	52	30
25Л	461	285	25	60	10
20ГЛ	500	400	31	50	20
20ХГСФЛ	600	450	28	48	30
12ХГФЛ	543	345	27	54	20

Таблица 5

Механические свойства металла отливок из низкоуглеродистых сталей, модифицированных нанодисперсными частицами

Сталь	Механические свойства				
	σ_b , МПа	σ_m , МПа	δ , %	ψ , %	KCV при $t = -60$ °С, Дж/см ²
09Г2СЛ	605	450	32	69	145
25Л	621	455	26	70	83
20ГЛ	500	400	35	65	126
20ХГСФЛ	600	450	34	68	134
12ХГФЛ	599	438	30	70	158

Большим преимуществом центробежного электрошлакового литья является обеспечение высокой оперативности выпуска различной номенклатуры и типоразмеров изделий.

Разработанная технология может быть использована для изготовления заготовок деталей запорной арматуры, фланцев, переходов, тройников и других деталей, предназначенных для работы в условиях Крайнего Севера.

Заключение. Комплексный подход к подготовке расплава при электрошлаковом литье, включающий его глубокое раскисление добавкой, содержащий редкоземельные металлы, и ввод модифицирующего комплекса, содержащего нанодисперсные частицы пироуглерода, позволяет изготавливать отливки из широкого класса сталей с высоким уровнем хладостойкости.

Библиографический список

1. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Бойко Г. А. Электрошлаковое литье. Киев: Наукова думка, 1980. 192 с.
2. Патон Б. Е., Медовар Б. И. Электрошлаковая тигельная плавка и разливка металла: моногр. Киев: Наукова думка, 1988. 214 с.
3. Еремин Е. Н., Жеребцов С. Н. Электрошлаковая ресурсосберегающая технология производства фланцевых заготовок // Литейное производство. 2003. № 6. С. 21–22.
4. Медовар Б. И., Цыкуленко А. В., Шевцов В. Л. [и др.]. Металлургия электрошлакового переплава. Киев: Наукова думка, 1986. 248 с.
5. Патон Б. Е., Медовар Б. И. Электрошлаковый металл. Киев: Наукова думка, 1981. 677 с.
6. Сабуров В. П., Еремин Е. Н., Черепанов А. Н. [и др.]. Модифицирование сталей и сплавов дисперсными инокуляторами: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. 211 с.
7. Хрычиков В. Е., Калинин В. Т., Кривошеев В. А. Ультрадисперсные модификаторы для повышения качества отливок // Литейное производство. 2007. № 7. С. 2–5.
8. Полубояров В. А., Коротаяева З. А., Черепанов А. Н. [и др.]. Применение механически активированных ультрадисперсных керамических порошков для улучшения свойств металлов и сплавов // Наука производству. 2002. № 2. С. 2–8.
9. Предтеченский М. Р., Черепанов А. Н., Тухто О. М. [и др.]. Плазмохимический синтез нанопорошков тугоплавких соединений и их применение для модифицирования конструкционных сталей и сплавов // Литейщик России. 2010. № 3. С. 28–29.
10. Артемьев А. А., Соколов Г. Н., Лысак В. И. Влияние микрочастиц диборида титана и наночастиц карбонитрида титана на структуру и свойства наплавленного металла // Металловедение и термическая обработка материалов. 2011. № 12 (678). С. 32–37.
11. Соколов Г. Н., Лысак В. И., Трошков А. С. [и др.]. Модифицирование структуры наплавленного металла нано-

дисперсными карбидами вольфрама // Физика и химия обработки материалов. 2009. № 6. С. 41–27.

12. Александров В. М., Кулаков Б. А. Пироуглерод в литейном производстве // Литейное производство. 1993. № 1. С. 17–18.

13. Комшуков В. П., Фойгт Д. Б., Черепанов А. П. [и др.]. Модифицирование непрерывнолитой стали тугоплавкими соединениями // Сталь. 2009. № 4. С. 65–68.

14. Зайцев А. И., Крапошин В. С., Родионова И. Г. [и др.]. Комплексные неметаллические включения и свойства стали. М.: Металлургиздат, 2015. 276 с. ISBN 978-5-902194-85-9.

15. Штремель М. А. Разрушение: моногр. В 2 кн. М.: Издат. дом МИСиС, 2014. Кн. 1. 669 с.

16. Kumar A. S., Kumar B. R., Datta G. L. [et al.]. Effect of microstructure and grain size on the fracture toughness of a micro-alloyed steel // Materials Science Engineering A. 2010. Vol. 527, Issue 4-5. P. 954–960. DOI: 10.1016/j.msea.2009.09.027.

17. Горынин В. И., Кондратьев С. Ю., Оленин М. И. Повышение сопротивляемости хрупкому разрушению перлитных и мартенситных сталей при термическом воздействии на морфологию карбидной фазы // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. № 10. С. 22–29.

18. Новиков В. Ю. Аномальный рост зерна: влияние дисперсных частиц // Металловедение и термическая обработка металлов. 2018. № 3. С. 3–9.

ЕРЕМИН Евгений Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Машиностроение и материаловедение» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), директор машиностроительного института ОмГТУ.

SPIN-код : 2894-2461

Author ID (РИНЦ): 175269

Researcher ID (WoS): J-4245-2013

Author ID (SCOPUS): 6603904601

МИННЕХАНОВ Гизар Нигъматьянович, директор ООО «Технологический центр», г. Омск.

Author ID (РИНЦ): 566737

МИННЕХАНОВ Руслан Гизарович, заместитель директора ООО «Технологический центр», г. Омск.

Author ID (РИНЦ): 566738

Адрес для переписки: weld_techn@mail.ru

Для цитирования

Еремин Е. Н., Миннеханов Г. Н., Миннеханов Р. Г. Повышение качества литого металла запорной арматуры комплексным модифицированием дисперсными инокуляторами // Омский научный вестник. 2018. № 3 (159). С. 5–9. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-159-5-9.

Статья поступила в редакцию 23.04.2018 г.

© Е. Н. Еремин, Г. Н. Миннеханов, Р. Г. Миннеханов