



There is shown that the using of the centrifugal electroslag casting and modification of cast metal by dispersed hard inoculants allows to produce the high-temperature pipes of heaters from alloy ХН38ВТ not only with good quality of forming, but with more heat-resistant characteristics as well.

Е. Н. ЕРЕМИН, С. Н. ЖЕРЕБЦОВ, Омский государственный университет

УДК 621.74.042:669.187.56

ПРИМЕНЕНИЕ ИННОКУЛИРУЮЩЕГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ ЛИТЬЕ ТРУБ ИЗ СПЛАВА ХН38ВТ

Потребность современной техники в полых, в том числе трубных заготовках исключительно велика. Так, в металлургических и машиностроительных отраслях промышленности в качестве нагревательных элементов газовых термических печей широко используются жаропрочные трубы. Конструкция нагревательного элемента предусматривает соединение отдельных его частей с помощью сварки. Обеспечить высокое качество швов, работающих при высоких температурах, в случае использования высоколегированных сплавов трудноосуществимо. Поэтому в качестве материала для изготовления радиационных труб наибольшее применение нашли хромоникелевые окалиностойкие стали типа Х23Н18 (ЭИ417), Х25Н20С2 (ЭИ283) и др. [1, 2].

В то же время при работе нагревательного элемента имеет место несимметричность теплового потока и температур по периметру трубы. Вследствие этого радиационные трубы довольно быстро выходят из строя из-за прогара корпуса в горелочной части, где формируются зоны наибольших температур сравнительно коротких факелов, создаваемых горелками.

Поэтому проблема повышения стойкости горелочной части трубы — наиболее слабого звена нагревательного элемента — весьма актуальна. Вместе с тем в двигателестроении для изготовления сварных конструкций используются сплавы с длительным сроком службы при высоких температурах, в частности ХН38ВТ (ЭИ703), имеющие высокую окалиностойкость [3]. Поэтому представляется целесообразным использовать эту сталь для производства литых труб нагревательных элементов.

Обычно подобные трубы изготавливают центробежным литьем в водоохлаждаемую изложницу, покрытую изнутри теплоизоляционным и противопопригарным слоем [4, 5]. Наружный диаметр таких труб для разных печей от 114 до 168 мм, толщина стенки 8–12 мм и длина до 1600 мм. Поскольку при этом используются сыпучие теплоизоляционные материалы, поверхности труб

имеют дефекты, поэтому приходится преднамеренно увеличивать толщину стенки. Кроме того, при заливке вследствие окисления металла имеет место угар легирующих элементов, что определяет дополнительные трудности при литье высоколегированных сталей, применяемых, в частности, для изготовления радиационных труб.

Вместе с тем в последние годы все более широкое применение для получения полых заготовок находит электрошлаковое литье (ЭШЛ), обеспечивающее принудительное заполнение литейной формы жидким металлом. К заготовкам, полученным методом ЭШЛ и имеющим высокое качество металла, можно также отнести и трубы с толщиной стенки свыше 40 мм. Такие трубы получают путем переплава одного или нескольких расходуемых электродов в вертикальных подвижных и неподвижных кристаллизаторах [6–8]. Производство тонкостенных труб по такой технологии практически осуществить невозможно.

В связи с этим были проведены исследования по ЭШЛ таких труб на горизонтальной центробежной машине.

Трудность задачи заключается, во-первых, в том, что литейные формы, предназначенные для получения трубных заготовок малого диаметра с относительно тонкой стенкой и требуемой длиной, промышленностью на стандартном литейном оборудовании традиционными видами литья полностью не проливаются. Во-вторых, в литом металле не обеспечивается строго заданный химический состав. В первую очередь не происходит полное усвоение титана, определяющего основные свойства сплава. Кроме того, электрошлаковый металл имеет столбчатую крупнозернистую структуру с большой протяженностью первичных осей дендритов. Все эти факторы не обеспечивают в полной мере требуемые служебные характеристики литого металла. В связи с этим совершенствование технологии ЭШЛ жаропрочных сплавов является актуальной задачей.

Поэтому первоначально были проведены контрольные плавки, которые выявили слабые места

литейной технологии. Получены результаты, на основе которых изменены узлы горизонтальной центробежной машины, спроектирована новая литейная трубная форма и переделан заливочный желоб. Плавильную емкость подняли относительно оси вращения центробежной машины, что позволило увеличить гидростатический напор струи жидкого металла, в результате чего улучшились условия его растекания и сократилось время заливки. Кроме того, уменьшилась скорость охлаждения всей массы заливаемого металла на внутренней поверхности литейной формы, что предотвратило образование заливов, которые наблюдались ранее.

Затем была проведена оптимизация состава флюса и исследовано влияние модифицирования литого металла дисперсными инокуляторами на свойства сплава ХН38ВТ. Переплав осуществляли в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе, обеспечивающем “стерильные” условия плавки на установке А-550У с источником питания ТШС-3000-1. Заливка труб производилась в нефутированный металлический кокиль (литейная форма), закрепленный в люнетах горизонтальной центробежной машины.

По разработанной технологии первоначально в плавильной емкости с помощью расходуемого электрода большого диаметра накапливается необходимое количество жидкого металла. Поскольку наличие малого расстояния между наружной стенкой литейной формы – кокиля и внутренней поверхностью получаемой трубы определяет повышенную скорость кристаллизации металла в зоне формирования изделия, то большое значение имеет состав применяемого флюса. Он должен иметь высокую температуру плавления, большой температурный интервал затвердевания, обладать заметной текучестью при высокой скорости охлаждения и обеспечивать стабильность гарнисажного слоя по всей длине заготовки. В качестве рабочих шлаков исследовали высокофтористые флюсы, которые наиболее широко применяются при электрошлаковой плавке высоколегированных сталей и сплавов. В результате установили, что наименьший угар титана и наилучшие формирующие свойства обеспечивает флюс системы

$\text{CaF}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ с добавкой небольшого количества SiO_2 .

С целью повышения эксплуатационной надежности труб использовали объемное модифицирование литого металла дисперсными инокуляторами. Применяли модификатор, в состав которого входит молибден, ванадий и никель. Выбор модификатора осуществили из следующих соображений. Дисперсные частицы молибдена, имеющие высокую температуру плавления, являются инокуляторами – центрами зародышеобразования. Ванадий имеет подобную молибдену кристаллическую решетку, небольшую разницу в электроотрицательности и атомном диаметре, что обуславливает образование между ними непрерывных рядов твердых растворов [9]. В силу известного принципа “подобное смачивается (адсорбируется) подобным” [10], атомы ванадия при вводе модификатора в расплав избирательно адсорбируются поверхностью частиц молибдена. Большое сродство ванадия к азоту должно увеличивать зародышеобразующую активность частиц молибдена. Никель обеспечивает изоляцию частиц инокулятора (молибдена) друг от друга, предотвращая тем самым их слипание и коагуляцию на стадии ввода модификатора в расплав. Модификатор получали смешиванием порошковых компонентов с последующим прессованием в таблетку диаметром 30 мм и толщиной 10 мм. Одна таблетка рассчитана на обработку 10 кг расплава. Модификатор вводили за 2–3 мин до слива расплава в кокиль.

Оценку жаростойкости проводили в угольной печи сопротивлением (печи Таммана). Для этого из металла заготовки изготавливали плоские образцы, которые подвергали выдержке при температуре 1273 К. Степень жаростойкости металла определяли с помощью расходного коэффициента

в виде отношения $\frac{G}{S}$, где G – прирост массы окислы за время испытаний; S – площадь образца.

Сравнительные характеристики металла, полученного различными способами, приведены в таблице.

Сравнительные характеристики металла образцов из сплава ХН38ВТ

Способ получения	σ_B , МПа	σ_{02} , МПа	δ , %	ψ , %	G/S при $T=1273$ К, г/м ²
Прокат	850	500	18	40	1,8
Индукционная плавка	824	576	11	21	3,2
ЦЭШЛ	856	507	13	26	1,9
ЦЭШЛ + модифицирование	868	521	18	38	1,4

Из опытных данных следует, что при температуре 1273 К образование оксидной пленки идет быстрее на образцах из стали открытой выплавки. Максимальный прирост массы окалины (G/S) составил 3,2 г/м² за 12 ч испытаний. Окалина на этих образцах довольно рыхлая и сравнительно легко отслаивается от поверхности. Меньший прирост массы окалины за то же время отмечается у литого электрошлакового металла (1,9 г/м²) и металла проката (1,8 г/м²). Более лучшую жаростойкость показал модифицированный электрошлаковый металл (1,4 г/м²). Следует ожидать, что эта тенденция сохранится и при более длительной выдержке. Повышение жаростойкости коррелирует и с улучшением механических свойств металла при нормальной температуре.

Это можно объяснить тем, что важными факторами, определяющими качество и служебные свойства жаропрочных сплавов, являются фазовый состав, состояние границ зерен, их величина, степень однородности и морфология и топография включений [11,12]. Изучение структуры литого немодифицированного электрошлакового металла (рис. 1) показывает, что макроструктура транскристаллическая, состоящая из крупных столбчатых кристаллов по периферии и равноосных в центре. Протяженность столбчатых зерен до 20 мм, диаметр зерен в центре до 10 мм. Включения карбидов в виде каркасов сплошной скелетообразной формы, называемых «китайским шрифтом», располагаются преимущественно по границам зерен и имеют очень большую протяженность. Карбиды подобной морфологии оказывают отрицательное влияние на свойства никелевых сплавов. Заметна значительная коагуляция частиц γ' -фазы. Она имеет округлые формы и хаотичное расположение в матрице, особенно вблизи карбидной фазы. Такая структура металла обуславливает растворение γ' -фазы в γ' -твердом растворе при высоких температурах, что приводит к разупрочнению сплава и понижению его жаропрочности.

Введение в металл при переплаве 0,1% модификатора вызывает существенное изменение как получаемой структуры, так и морфологии и топографии карбидной фазы (рис. 2). Происходит резкое измельчение макрозерна, устраняются столбчатость зерен и разнотернистость. Дендритная структура литого металла тонкая и однородная по сечению слитка. Карбиды приобретают компактную равноосную форму и равномерно распределены по объему зерна. Образование большого количества компактных карбидов можно объяснить увеличением степени переохлаждения расплава при введении в него модификатора. По-видимому, нерасплавившиеся твердые дисперсные частицы молибдена смачиваются концентрированной по ванадию жидкостью. Адсорбирующийся на поверхности частиц молибдена вана-

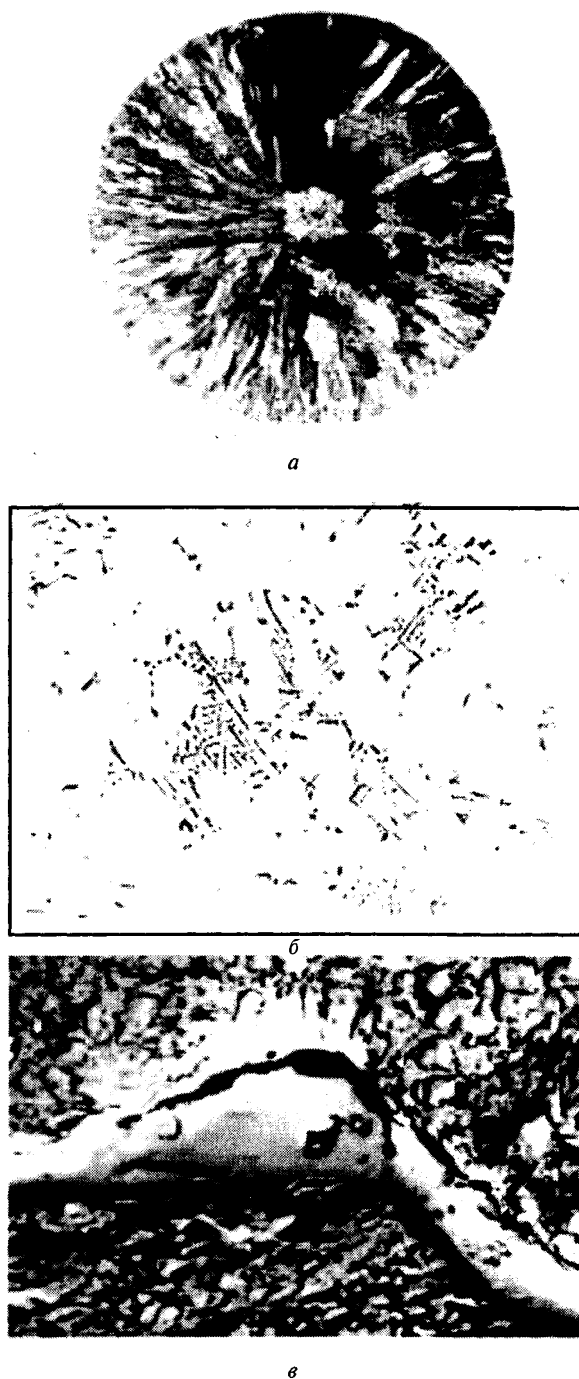
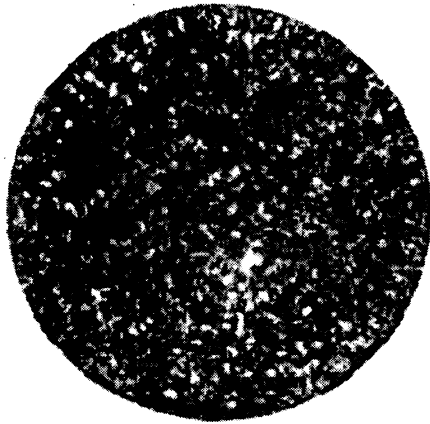
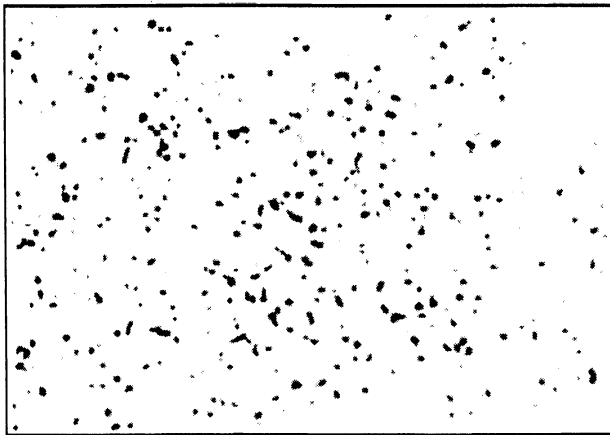


Рис. 1. Структура литого немодифицированного электрошлакового металла: а – макроструктура. $\times 1$; б – карбидная фаза. $\times 500$; в – структура γ' -фазы вблизи карбида. $\times 2000$

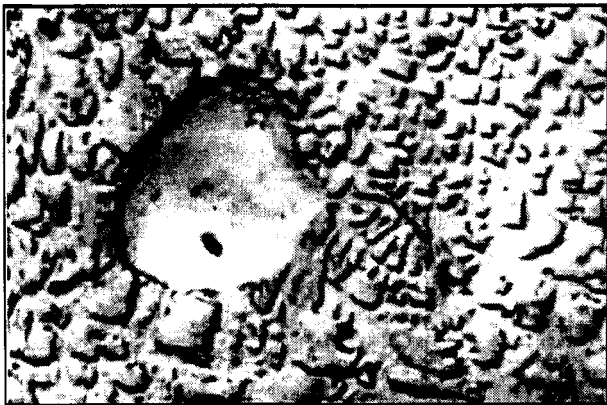
дий, а также его соединения с углеродом расплава меняют поверхностные свойства частиц в отношении зародышеобразования, обуславливая тем самым более эффективное измельчение дендритной структуры литого металла. Такая морфология и топография карбидной фазы повышают химическую стабильность матрицы путем связывания легирующих элементов, взаимодействующих с углеродом, и оказывают благоприятное воздействие на длительную прочность сплава и его жаростойкость. Граница зерна имеет вид извилистой линии, огибающей частицы, расположенные в матрице сплава. Обращают на себя



a



b



c

Рис. 2. Структура литого модифицированного электрошлакового металла: а – макроструктура. х1; б – карбидная фаза. х500; в – структура γ' -фазы вблизи карбида. х2000

внимание и изменения в строении γ' -фазы. Коагуляция частиц γ' -фазы не наблюдается. Она приобретает прямые линейные очертания и упорядоченное расположение в матрице, в том числе и по соседству с карбидной фазой. Такое состояние структуры говорит о том, что границы зерен

«закреплены» частицами и поэтому их миграция при нагреве незначительна. При воздействии нагрузки частицы взаимодействуют с дислокациями по механизму перерезания [13], а, следовательно, повышают свойства сплава при высоких температурах.

Таким образом, применение центробежного электрошлакового литья и модифицирования литого металла дисперсными тугоплавкими инкуляторами позволяет получать жаропрочные трубы нагревателей из сплава ХН38ВТ не только с хорошим качеством формирования их поверхностей, но с более высокими жаростойкими свойствами. Перспективность использования таких труб в промышленности будет определена по результатам проведения комплекса производственных эксплуатационных испытаний.

Литература

1. Остапенко Л. Н., Тигельман С. М., Крнейнинг Е. В., Шуляк В. Ф. Применение тупиковых радиационных труб в агрегатах для химико-термической обработки // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1980. № 1. С. 30–32.
2. Гоман В. Г. Повышение надежности системы обогрева печей отжига отливок // *Литейное производство*. 1988. № 9. С. 26–27.
3. Масленков С. Б., Масленкова Е. А. Стали и сплавы для высоких температур: Справ. изд. в 2-х кн. Кн. 1. М.: *Металлургия*, 1991.
4. Юдин С. Б., Левин М. М., Розенфельд С. Е. *Центробежное литье*. М.: *Металлургия*, 1972.
5. Рулла Н. В., Гендлер И. И., Можаренко И. П. и др. Центробежное литье труб из стали 20Х23Н28М3Д3Т // *Литейное производство*. 1966. № 10. С. 41–42.
6. Медовар Б. И., Шевцов В. Л., Маринский Г. С. и др. Центробежное электрошлаковое литье изделий из сталей и сплавов // *Специальная электрометаллургия*. 1981. Вып. 45. С. 8–15.
7. Жадкевич М. Л., Федоровский Б. Б., Бородин А. Н., Статников Б. Ш. Высококачественные литье полые заготовки // *Литейное производство*. 1988. № 8. С. 12–13.
8. Баглай В. М., Федоровский Б. Б., Тимашов Г. А. Получение тонкостенных труб методом электрошлакового литья // *Проблемы спец. электрометаллургии*. 1976. Вып. 5. С. 34–36.
9. Савицкий Е. М., Бурханов Г. С. *Металловедение сплавов тугоплавких и редких металлов*. М.: *Наука*, 1971.
10. Химушин Ф. Ф. *Жаропрочные стали и сплавы*. М.: *Металлургия*, 1969.
11. Логунов А. В., Петрушин П. В., Кукшова Е. А., Должанский Ю. М. Прогнозирование влияния структурных факторов на механические свойства жаропрочных сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1987. № 6. С. 16–20.
12. Власова О. Н., Корнеева Н. Н., Еременко В. И. и др. Оптимизация результатов термической обработки деформированных полуфабрикатов из среднелегированных жаропрочных никелевых сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1993. № 1. С. 31–34.