

ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ В ИНДУКЦИОННЫХ ТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗВРАТА И ОТРАБОТАННОЙ ТАРЫ

П. Э. РАТНИКОВ, канд. техн. наук, **Г. А. РУМЯНЦЕВА**, канд. техн. наук, **И. А. ТРУСОВА**, д-р техн. наук, **И. А. ПЕТРИЧЕНКО**
Белорусский национальный технический университет

В статье проанализирована технология производства отливок для изготовления жаропрочной оснастки в высокочастотных индукционных тигельных печах с кислой футеровкой. Приведено сравнение технологий модификации расплава силикокальцием СК25 и барий-стронциевыми карбонатами БСК-2. Показано, что обработка расплава БСК-2 в количестве 0,3 % позволяет отказаться от применения дорогостоящего силикокальция марки СК25 и использовать в шихте более низкосортные материалы без ухудшения качества получаемых отливок. Установлено влияние массы и размера фракции БСК-2 на структуру и механические свойства стали 45Х23Н17СЛ

Ключевые слова: *оснастка, легированные стали, неметаллические включения, микролегирование, индукционная печь, жаропрочность, жаростойкость, модифицирование барий-стронциевыми карбонатами БСК-2.*

TECHNOLOGY OF HEAT-RESISTANT STEEL SMELTING IN INDUCTION CRUCIBLE FURNACES USING RETURN AND SPENT CONTAINERS

P. E. RATNIKOV, Ph. D. in Technical Sciences, **G. A. RUMYANTSEVA**, Ph. D. in Technical Sciences, **I. A. TRUSOVA**, Dr. of Engineering Sciences, **I. A. PETRICHENKO**
Belarusian National Technical University

The article analyzes the technology of production of castings for the manufacture of heat-resistant equipment in high-frequency induction crucible furnaces with acid lining. A comparison of melt modification technologies with silico-calcium SK25 and barium-strontium carbonates BSK-2 is given. It is shown that the processing of the BSK-2 melt in an amount of 0.3 % makes it possible to

abandon the use of expensive silicocalcium of the SK25 brand and use lower-grade materials in the charge without deterioration of the quality of the castings obtained. The influence of the mass and size of the BSK-2 fraction on the structure and mechanical properties of 45X23N17SL steel has been established

Keywords: *tooling, alloy steels, non-metallic inclusions, micro-alloying, induction furnace, heat resistance, heat resistance, modification with barium-strontium carbonates BSK-2.*

Процесс термической и химико-термической обработки требует наличия соответствующей оснастки, которую изготавливают из жаропрочных сталей. Как правило, для этих целей применяют жаропрочные стали аустенитного класса, высоколегированные хромом и никелем. Производство таких сталей в плавильных агрегатах литейного класса вызывает определенные технологические и организационные трудности, а покупка оснастки за рубежом приводит к потере валюты предприятием. Таким образом, разработка современных технологических принципов выплавки жаропрочных сталей в условиях отечественных электропечей литейного класса на основе экспериментально-теоретических исследований позволит снизить себестоимость и повысить качество литья, а также решить задачу импортозамещения.

Основными преимуществами индукционных тигельных печей перед другими литейными агрегатами, например, дуговыми электропечами, являются:

- незначительный угар легирующих элементов, присутствующих в шихте и ферросплавах;
- хорошее перемешивание жидкого металла способствует выравниванию температуры по всему объему ванны и обеспечивает большую однородность химического состава стали;
- нет науглероживания металла от электродов, что позволяет переплавлять высоколегированные отходы без добавок низкоуглеродистой стали;
- высокая вязкость шлаков и их малая жидкоподвижность способствует защите металла от проникновения газов (водорода и азота) из атмосферы;

– компактность самой печи позволяет помещать ее в закрытые емкости, где возможно создавать регулируемую атмосферу, и вести плавку с разливкой металла под вакуумом.

К недостаткам индукционной плавки относится низкая температура шлаков и малая их химическая активность, что затрудняет диффузионные процессы дефосфорации, раскисления и десульфурации.

Плавка в индукционных печах осуществляется методом переплава металлолома. Состав шихты подбирают близким к заданному. Холодные вязкие шлаки защищают металл от газопоглощения и окисления. В индукционных печах выплавляют все марки стали, но особенно перспективно их применение для производства высоколегированных. Содержание легированных отходов в шихте может быть доведено до 100 % при практически полном сохранении таких дефицитных легирующих элементов, как никель, молибден, вольфрам, ванадий, хром.

Анализ взаимосвязи используемых шихтовых материалов и их качества с уровнем термической стойкости оснастки показал, что для одной и той же марки стали максимальной термостойкостью обладают отливки, полученные с использованием обновленной чистой шихты. Минимальная термостойкость отливок наблюдается при высоком содержании в шихте возврата собственного производства. При этом максимальное снижение термостойкости было зафиксировано при использовании в шихте, кроме возврата собственного производства, отработавшей свой срок оснастки. Следовательно, можно предположить, что основной причиной снижения эксплуатационной стойкости оснастки, полученной с использованием в шихте низкосортных материалов, является повышенная загрязненность расплава и склонность его к пленообразованию в процессе заливки форм и кристаллизации расплава в литейной форме.

Была проанализирована технология производства отливок «поддон» и «лента соединения», где для получения расплава используются индукционные высокочастотные печи ИСТ-1,0 с кислой футеровкой. Заливку форм из ПГС проводили с помощью стопорного ковша емкостью 1 т с нейтральной футеровкой. В процессе выпуска из печи и перелива в ковш стальной расплав при температуре 1680 °С обрабатывали кусковым алюминием и силикокальцием марки СК25. Заливка последних форм из ковша была проблематич-

ной, а иногда и невозможной ввиду относительно низкой жидкотекучести стали 12Х18Н9ТЛ.

Анализ полученных результатов позволил предположить, что причиной снижения термостойкости оснастки является накопление негативных наследственных факторов, связанных как с используемым технологическим оборудованием, так и с составом шихтозавалки и обработкой стального расплава перед его разливкой по формам.

К недостаткам технологического оборудования относится использование в качестве огнеупорного материала плавильной печи кварцита SiO_2 . Как известно, сталь, выплавленная в печах с кислой футеровкой, имеет худшие показатели качества и механических свойств в сравнении со сталью, выплавленной в печах с основной или нейтральной футеровкой [1]. Это объясняется интенсивным износом кварцевой футеровки печи при выплавке легированных сталей, нарастающим со степенью легирования стали. В рассматриваемом случае стойкость футеровки печей составляет лишь 15–30 плавов, то есть за одну плавку 3–6 % рабочего слоя материала стен печи в виде неметаллических включений мигрируют в выплавляемый стальной расплав.

Значительная часть неметаллических включений попадает в шлаковую фазу и впоследствии удаляется из стального расплава, при этом оставшаяся (меньшая) часть неметаллических включений сохранится в расплаве в виде стабилизированной взвеси, не идентифицируемой световой микроскопией ввиду малости размеров – до 1 мкм (таблица 1) [2], и будет присутствовать в различных частях литниковой системы, в том числе в отливках.

Количество неметаллических включений в каждой последующей плавке относительно предыдущей будет возрастать по причине сложения некоторого количества неметаллических включений из возврата в шихте с вновь поступившими включениями из футеровки печи. Таким образом, результирующее количество загрязнений в стальном расплаве характеризует качество получаемых отливок, и между ними имеется взаимобратная зависимость [1]. Помимо загрязнений из возврата и футеровки, ощутимое влияние на термостойкость оснастки оказывает структура стали в отправленных на переплав в шихту отработавших свой ресурс «поддонах» и «лент соединения», другими словами – влияет фактор наследственности.

Используемая в шихте бывшая в употреблении оснастка, помимо исходной группы неметаллических включений и большого количества дополнительно образовавшихся во время эксплуатации различных оксидов и плен, характеризуется измененной ослабленной микроструктурой, а именно – окислением межзеренных границ. Такая комплексная, накопленная дефектность негативно влияет на потребительские свойства новых отливок. Используемое в качестве компенсирующей контрмеры увеличение температуры перегрева стального расплава в плавильной печи не гарантирует достижения положительных структурных изменений и снижения доли загрязнений при их разложении, вызывая дополнительный износ футеровки печи [3].

Таблица 1 – Форма и размеры неметаллических включений

Тип включения	Размеры, мкм		Кристаллическая система и форма включения
	максимальный	основной	
Сульфид марганца MnS	8	4	Кубическая, главным образом кристаллы правильной формы – квадраты, ромбы, шестигранники
Сульфид железа и марганца (твердый раствор) FeS–MnS	22	5–9	Форма неправильная – глобулы и эвтектика
Карбонитрид (цианид) титана TiCN	9	2–4	Кубическая; кристаллы правильной формы – квадраты, треугольники
Твердый раствор закиси железа и закиси марганца FeO–MnO	18	7–10	Кубическая, неправильной формы
Кварцевое стекло SiO ₂	~ 1	< 1	Аморфная глобулярной формы

Согласно опытной технологии стальной расплав при сливе из плавильной печи обрабатывали, наряду с кусковым алюминием и силикокальцием марки СК25, материалом БСК-2-УС в количестве 3 кг/т (0,3 %), помещаемым на дно ковша. Было зафиксировано значительное улучшение литейных свойств (жидкотекучести) стально-

го расплава – снижение количества брака по недоливам, спаям и усадочным раковинам. Улучшение жидкотекучести позволило снизить температуру заливки форм стальным расплавом на 10–20 °С без сокращения времени разлива. Дополнительно в процессе заливки отмечены такие положительные моменты, как отсутствие подтеков и затягивания стопора. Химический состав БСК-2-УС приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Химический состав БСК-2-УС

Массовая доля, %											
SiO ₂	BaO	CaO	SrO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃ (FeO)	MnO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CO ₂
11,0	19,8	20,0	9,5	0,8	3,0	1,6	1,5	0,01	н,з	0,5	21,0

Упрощенно работу опытного рафинирующее-дегазирующего материала БСК-2-УС можно представить как аналог используемой в большой металлургии процедуры продувки расплава инертными газами. В процессе заполнения ковша помещенный на дно материал из карбонатов ЩЗМ при контакте с жидким расплавом начинает интенсивно разлагаться с выделением значительного количества CO₂. При образовании и движении через толщу расплава пузырьки CO₂ интенсивно структурно и химически перемешивают и гомогенизируют металл. При всплытии на поверхность пузырьки CO₂, увеличиваясь в размерах, захватывают и выносят на поверхность как растворенные в расплаве газы, так и включения разного происхождения [3].

По итогам проведенных опытных работ получены отливки, не только не уступающие, но и превосходящие по качеству отливки, изготовленные с использованием обновленной шихты.

Это позволило исключить применение малоэффективной модифицирующей добавки – дорогостоящего силикокальция марки СК25 с заменой на более экономичный материал БСК-2-УС.

Дополнительно к замене дорогостоящих модифицирующих добавок типа силикокальция марки СК25, применение БСК-2-УС позволило использовать в шихтозавалке ранее не применявшиеся низкосортные материалы без ухудшения качества получаемых отливок.

Для определения структуры и механических свойств заливали «трефы», из которых изготавливали образцы на растяжение и ударную вязкость. Жидкотекучесть стали определяли по спиральной пробе путем замера длины залитой спирали. Исследования показали, что модифицирование стали после предварительного раскисления алюминием как первым, так и вторым модификатором приводит к повышению предела прочности и относительного удлинения при сохранении твердости на одном и том же уровне по сравнению с исходным расплавом.

При этом наиболее высокие свойства достигаются после обработки барий-стронциевым карбонатом в количестве 0,5–0,7 %. Ввод присадки модификатора ФС30Р3М30 в количестве 0,5 % повысил предел прочности до 591 МПа, в то время как обработка карбонатом увеличила предел прочности до 682 МПа. Одновременно относительное удлинение возросло после ввода модификатора до 45 %, а при обработке модификатором ФС30Р3М30 повысилось только до 33 %.

Анализ структуры стали в исходном состоянии и после обработки модификаторами показал, что модифицирование уменьшает количество карбидных включений в теле и на границах зерен, а ввод карбонатов – и размер самого зерна. Отмечено также и повышение жидкотекучести стали после модифицирования. Повышение жидкотекучести расплава, обработанного карбонатами, можно связать с уменьшением количества неметаллических включений, содержания газов и изменением процесса первичной кристаллизации [4].

В результате сравнительного анализа модифицирующих присадок установлено, что более высокие механические и литейные свойства достигаются при обработке барий-стронциевым карбонатом. В этом случае образуется структура с меньшим размером зерна и практически отсутствуют карбидные включения. С целью отработки метода ввода барий-стронциевых карбонатов были проведены опытные плавки в индукционной тигельной печи емкостью 150 кг с БСК-2 различных фракций, который подавали в ковш при его заполнении расплавом стали. Температура модифицирования составляла 1600 °С. Механические свойства и структуру контролировали на образцах, вырезанных из заливаемых после обработки расплава трэф. Исследования механических свойств стали, обработанной карбонатами разной фракции, показали, что более высокие свойства

достигаются при вводе присадки 1–2 мм (таблица 3). Уменьшение фракции присадки до < 0,5 мм снижает предел прочности до 600 МПа по сравнению с 678 МПа при вводе присадки фракции 1–2 мм.

Таблица 3 – Влияние размера фракции карбонатов и величины их присадки на механические свойства жаропрочной стали с 17 % никеля

Размер фракции, мм	Величина присадки	Механические свойства			
		$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{т}$, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость НВ
Исходной	–	520	300	26	190
3–5	0,3	580	340	28	179
	0,5	620	360	30	179
	0,7	630	358	33	170
1–2	0,3	590	360	34	170
	0,5	670	380	39	190
	0,7	678	376	40	170
> 0,5	0,3	540	320	26	163
	0,5	590	340	30	170
	0,7	600	350	30	180

Таким образом, модифицирование жаропрочной стали барий-стронциевыми карбонатами за счет улучшения структуры (измельчения зерна, уменьшения карбидных включений), повышения технологических свойств (жидкостекучести, снижения температуры ликвидус) уменьшает вероятность образования рыхлот, усадочных раковин, плён, повышает эксплуатационные свойства отливок и их ресурс, и также позволяет отказаться от применения дорогостоящего силикокальция марки СК25 и использовать в шихте более низкосортные материалы без ухудшения качества получаемых отливок.

Список литературы

1. **Производство** стальных отливок / Л. Я. Козлов [и др.] – М.: МИСИС, 2003. – 352 с.

2. Фомичева, Н. Б. Влияние неметаллических включений на характеристики разрушения литых нержавеющей сталей / Н. Б. Фомичева, Е. В. Маркова // *Сталь*. – 2019. – № 3 – С. 53–56.

3. Морозов, С. С. Повышение эксплуатационной стойкости оснастки из жаропрочной аустенитной стали обработкой барий-стронциевыми карбонатитами / С. С. Морозов, А. А. Кузнецов, Д. А. Болдыров // *Сталь*. – 2020. – № 4. – С. 41–43.

4. Применение барий-стронциевых карбонатов для обработки жаропрочных сталей / А. П. Бежок [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2011. – № 3 – С. 109–114.

References

1. *Proizvodstvo stal'nyh otlivok* [Production of steel castings] / L. Ya. Kozlov [et al.]. – Moscow: MISIS Publ., 2003. – 352 p.

2. Fomicheva, N. B. *Vliyanie nemetallicheskih vklyucheniy na harakteristiki razrusheniya lityh nerzhaveyushchih stalej* [Influence of non-metallic inclusions on the fracture characteristics of cast stainless steels] / N. B. Fomicheva, E. V. Markova // *Stal' = Steel*. – 2019. – No. 3 – P. 53–56.

3. Morozov, S. S. *Povyshenie ekspluatacionnoj stojkosti osnastki iz zharoprochnoj austenitnoj stali obrabotkoj barij-stronciyevymi karbonatitami* [Improving the operational durability of equipment made of heat-resistant austenitic steel by treatment with barium-strontium carbonatites] / S. S. Morozov, A. A. Kuznetsov, D. A. Boldyrov // *Stal' = Steel*. – 2020. – No. 4. – P. 41–43.

4. *Primenenie barij-stronciyevyh karbonatov dlya obrabotki zharoprochnyh stalej* [Application of barium-strontium carbonates for processing heat-resistant steels] / A. P. Bezhok [et al.] // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2011. – No. 3. – P. 109–114.

Поступила 10.11.2022

Received 10.11.2022