

*Д-р техн. наук В. В. Примаченко,
канд. техн. наук В. В. Мартыненко, канд. техн. наук И. Г. Шу-
лик, канд. техн. наук С. В. Чаплянко, Л. В. Грицюк,
Л. П. Ткаченко, Т. Г. Тишина
(ПАО «УКРНИИ ОГНЕУПОРОВ ИМ. А. С. БЕРЕЖНОГО»,
г. Харьков, Украина)*

**Сопоставительные испытания
корундопериклазовых
и корундооксидцирконийсиликатных тиглей
в службе
при индукционной вакуумной плавке
коррозионностойких сплавов**

Введение

В ПАО «УКРНИИО ИМЕНИ А. С. БЕРЕЖНОГО» разработаны технологии и осуществляются изготовление и поставка потребителям конкурентоспособных на мировом рынке специализированных вибролитых тиглей различного состава (муллитокорундовых, корундошпинельных, корундопериклазовых и в последнее время — корундооксидцирконийсиликатных) для индукционной плавки широких групп сплавов [1—7]. В частности, для плавки коррозионностойких и жаропрочных сплавов на никелевой и кобальтовой основе применение получили корундопериклазовые тигли. Отличительной особенностью корундопериклазовых тиглей является высокая адсорбционная способность (способность поверхности адсорбировать окисленные элементы сплава) наряду с высокой стойкостью к инфильтрации составляющих сплава в огнеупор, а также хорошей термостойкостью. Такое сочетание свойств достигается за счет особой микротрещиноватой структуры корундопериклазовых тиглей и образующейся в огнеупоре посредством прямой твердофазовой реакции алюмомагнезиальной шпинели различного состава (твердые растворы с избытком Al_2O_3) [1; 8].

Благодаря этим ценным физико-техническим свойствам корундопериклазовые тигли (например, емкостью 50—70 кг расплава) обеспечивают среднюю стойкость 25 плавов при сохранении чистоты выплавляемого сплава до последней плавки, что

находится на уровне лучших мировых достижений в практике применения тиглей.

В настоящей статье приведены результаты сопоставительных испытаний тиглей новой конфигурации (крупногабаритные тигли) емкостью 90—120 кг расплава.

Экспериментальная часть

Для проведения испытаний были изготовлены способом вибролитья крупногабаритные тигли высотой 530 мм, верхним внешним диаметром 335 мм, толщиной стенки 25 мм (емкость — 90—120 кг расплава). Основные показатели свойств тиглей приведены в таблице.

Таблица

Основные показатели свойств корундопериклазовых (КПТ) и корундооксидцирконийсиликатных (КОЦСТ-80) тиглей

Наименование свойств	Марка тиглей	
	КПТ	КОЦСТ-80
Химический состав, мас. % : Al_2O_3	92,1—94,2	85,7—87,7
MgO	4,4—5,9	—
ZrO_2	—	8,4—10,2
Предел прочности при сжатии, Н/мм ²	53	230
Пористость открытая, %	24,8	17,7
Плотность кажущаяся, г/см ³	2,90	3,24
Термостойкость (1300 °С — вода), теплосмен	2	> 20

Испытания тиглей осуществляли на вакуумно-индукционной установке фирмы «LEYBOLD — HERAEUS» при плавке коррозионностойких сплавов на никелевой и кобальтовой основе, выплавляемых для изготовления коррозионностойкого покрытия на лопатки с направленной кристаллической структурой. Охранную зону, между плавильным тиглем и индуктором печи, заполняли электрокорундом. Шихту массой 90 кг (заполнение плавильного объема тигля расплавом при плавке составляло ~3/5) загружали в холодный тигель, который (после слива металла) охлаждали до комнатной температуры. Плавку сплавов (на никелевой и кобальтовой основе) осуществляли попеременно. Температура плавки составляла ~1450—1500 °С, продолжительность — 90—100 мин.

Результаты и обсуждение

Согласно результатам испытаний корундопериклазовые и корундооксидцирконийсиликатные тигли показали равную стойкость — 14 плавков. Следует отметить, что основной причиной снятия корундопериклазовых тиглей с эксплуатации стало развитие термической трещины, первоначально образующейся на тиглях при первом сливе металла, и развитие сетки микротрещин, а корундооксидцирконийсиликатных — эрозионное разъедание стенки тигля в районе «зеркала» металла.

Визуальная оценка внутренней (рабочей) поверхности корундопериклазовых тиглей после испытаний практически не показала ее изменений за исключением изменения цвета огнеупора с белого на насыщенный серовато-зеленовато-голубой и появления незначительной сетки «залеченных» трещин и микротрещин (рис. 1, *а*). Следует отметить, что гарнисаж по окончании каждой плавки легко удалялся с поверхности стенки этого тигля под механическим воздействием. В изломе стенки тигля наблюдается незначительная рабочая зона, которая вместе со шлаковой корочкой имеет среднюю глубину всего 0,1 мм, максимальную — до 0,5 мм. Переходная зона отсутствует. Маломощность

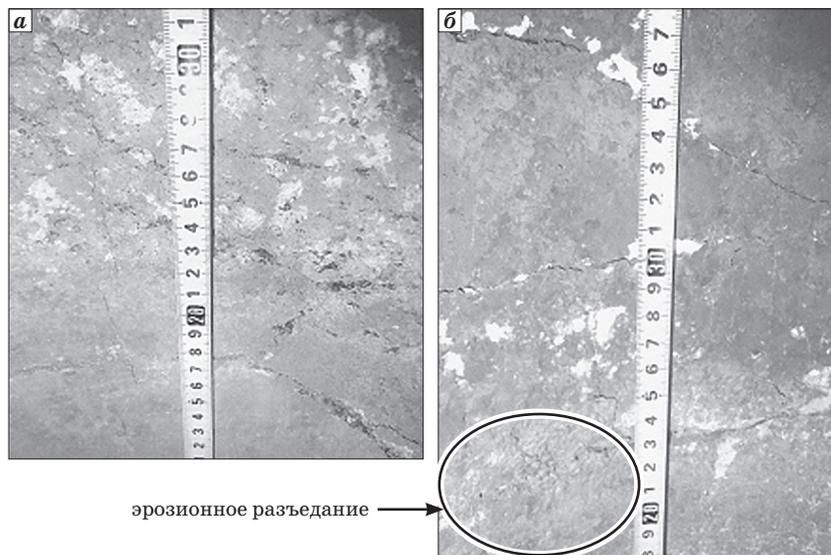


Рис. 1. Внутренняя поверхность корундопериклазового (*а*) и корундооксидцирконийсиликатного (*б*) тиглей после 14 плавков

рабочей зоны свидетельствует о высокой химической стойкости корундопериклазовых тиглей.

Внутренняя (рабочая) поверхность корундооксидцирконий-силикатных тиглей после испытаний имеет больше изменений по сравнению с корундопериклазовыми тиглями. На сливной поверхности тигля образовался жесткий гарнисаж; цвет огнеупора изменился с розовато-кремового на насыщенный серовато-зеленовато-голубоватый; наблюдается точечное эрозионное разъедание (глубиной до 5 мм, областью $\sim 45 \times 75$ мм) в районе «зеркала» металла, а также незначительное количество вертикальных и радиальных трещин со сколотыми краями (рис. 1, б). В изломе видна ярко выраженная зональность. Условно можно выделить три зоны: розовато-кремового цвета (наименее измененная зона), серо-бурого цвета (переходная зона) средней мощностью 2,5—3,0 мм (максимум — до 7 мм) и насыщенного серовато-зеленовато-голубого до темного фиолетово-синего (рабочая зона вместе со шлаковой корочкой) средней мощностью 0,05—0,06 мм (максимум — до 0,2 мм).

Для сравнения на рис. 2 показана внутренняя поверхность тиглей зарубежного производства, которые ранее использовали на предприятии. Как видно из рис. 2, кроме значительного эрозионного разъедания по всей рабочей поверхности тигля, имело место образование диаметральных трещин по виткам индуктора, которые при циркуляции металла были значительно вымыты и сколоты, а также имело место образование торцевых трещин, что недопустимо в связи с высоким риском пробоя тигля. Стойкость этих тиглей в сопоставительных условиях составляла 6—10 плавов.

Таким образом, проведенные испытания крупногабаритных корундопериклазовых и корундооксидцирконийсиликатных тиглей в службе показали эффективность их применения при плавке коррозионностойких сплавов. Тигли двух испытанных составов рекомендуются для индукционной вакуумной плавки сплавов на никелевой и кобальтовой основе, выплавляемых для изготовления коррозионностойкого покрытия на лопатки с направленной кристаллической структурой.

Заключение

Проведены сопоставительные испытания вибролитых крупногабаритных корундопериклазовых и корундооксидцирконийсиликатных тиглей емкостью 90—120 кг расплава при

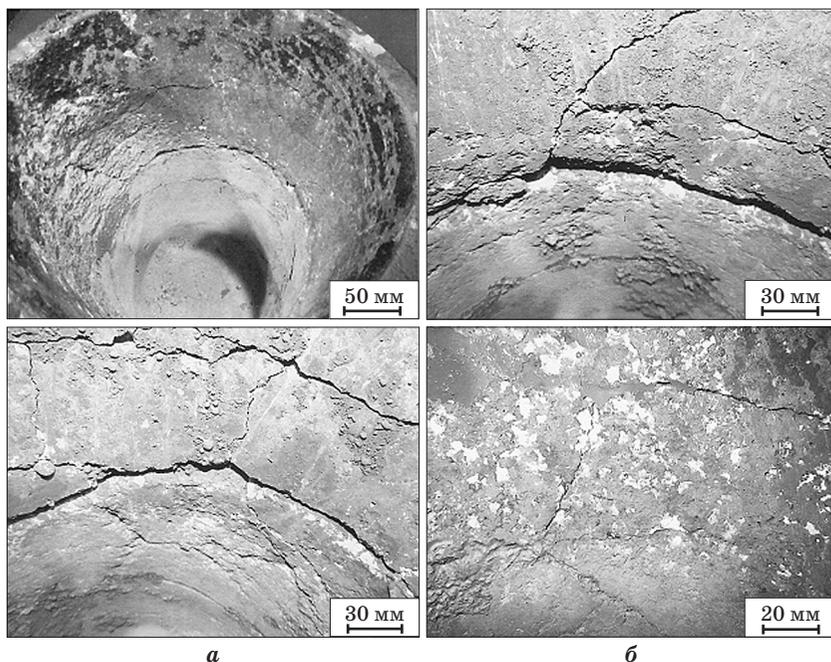


Рис. 2. Внутренняя поверхность тиглей различного состава зарубежного производства после 9 (а) и 10 (б) плавок

вакуумной индукционной плавке коррозионноустойчивых сплавов, выплавляемых для изготовления покрытий на лопатки с направленной кристаллизационной структурой. Показано значительное преимущество применения тиглей производства ПАО «УКРНИИО ИМЕНИ А. С. БЕРЕЖНОГО» в сравнении с тиглями зарубежного производства по количеству проведенных плавков (14 против 6—10), а также по химической стойкости, обеспечивающей чистоту выплавляемого сплава, и по надежности в эксплуатации.

Библиографический список

1. Исследование по разработке корундопериклазовых тиглей на основе плавящихся материалов / В. В. Примаченко, В. А. Устиченко, С. В. Чаплянко [и др.] // 36. науч. пр. ВАТ «УкрНДІВогнетривів ім. А. С. Бережного». — Х. : Каравелла, 2003. — № 103. — С. 49—57.
2. Разработка технологии тиглей для индукционной плавки жаропрочных сплавов / В. В. Примаченко, В. А. Устиченко, С. В. Чаплянко [и др.] // Литье—2006: науч. практ. выставка — конф., Запорожье, 15—16 мар. 2006 г. : тез. докл. — Запорожье : Запорожская Торгово-Промышленная Палата, 2006. — С. 72—73.

3. Studying of high-alumina and Al_2O_3 — MgO refractory crucibles interaction with high-temperature ferroniobium alloy / V. V. Primachenko, V. V. Martynenko, I. G. Shulik [etc.] // Stahl und Eisen. — 2010. — № 9. — P. 135—138.

3. Studying of high-alumina and Al_2O_3 — MgO crucibles interaction with heat-proof alloys based on nickel and cobalt / V. V. Primachenko, V. V. Martynenko, I. G. Shulik [etc.] // Refractories Worldforum. — 2012. — Vol. 4, № 3. — P. 106—110.

4. Вибролитые тигли различного состава для индукционной плавки жаропрочных сплавов / В. В. Примаченко, В. В. Мартыненко, И. Г. Шулик [и др.] // Литье и металлургия. — 2012. — № 3 (67). — С. 169—171.

6. Высокотермостойкие корундооксидцирконийсиликатные тигли для индукционной плавки жаропрочных сплавов / В. В. Примаченко, И. Г. Шулик, С. В. Чаплянко [и др.] // Технология и применение огнеупоров и техн. керамики в пром-сти : междунар. науч.-технич. конф., Харьков, 16—17 апр. 2013 г. : тез. докл. — Х. : Оригинал, 2013. — С. 6—7.

7. Испытание и исследование после службы при индукционной вакуумной плавке коррозионностойких сплавов корундооксидцирконийсиликатных и корундопериклазовых тиглей / В. В. Примаченко, И. Г. Шулик, С. В. Чаплянко [и др.] // Технология и применение огнеупоров и техн. керамики в пром-сти : междунар. науч.-технич. конф., Харьков, 29—30 апр. 2014 г. : тез. докл. — Х. : Оригинал, 2014. — С. 5—6.

8. Минералы : справочник : в 4 т. / Под ред. Ф.В. Чухрова. — М. : Наука, 1967. — Т. 2, вып. 3: Сложные окислы, титанаты, ниобаты, танталаты, антимонаты. — С. 18—33.

Рецензент к. т. н. Куценко К. И.