

*Канд. техн. наук И. Г. Шулик,
канд. техн. наук С. В. Чаплянко, Л. П. Ткаченко
(ПАО «УКРНИИ ОГНЕУПОРОВ ИМ. А. С. БЕРЕЖНОГО»,
г. Харьков, Украина)*

Сопоставительные испытания корундооксидцирконийсиликатных, муллитокорундовых, корундошпинельных тиглей в службе при плавке жаропрочных никелевых сплавов

Введение

В Украине на моторостроительных предприятиях (АО «МОТОР СИЧ» и ГП «Ивченко-Прогресс» (г. Запорожье, Украина)) применяют при индукционной плавке жаропрочных сплавов (в том числе для изготовления рабочих лопаток турбин низкого и высокого давления реактивных авиационных двигателей) тигли различных составов и типоразмеров, изготавливаемых в ПАО «УКРНИИО ИМЕНИ А. С. БЕРЕЖНОГО» [1—5]. В условиях ГП НПКГ «ЗОРЯ»-«МАШПРОЕКТ» (г. Николаев, Украина) ранее (с 2000-го по 2008 г.) при плавке жаропрочных никелевых сплавов успешно применяли плавильные корундошпинельные тигли типоразмера № 2 (рис. 1), также изготавливаемые в ПАО «УКРНИИО ИМЕНИ А. С. БЕРЕЖНОГО» [6; 7]. В последние годы в ПАО «УКРНИИО ИМЕНИ А. С. БЕРЕЖНОГО» разработаны корундооксидцирконийсиликатные тигли [8; 9], которые успешно испытаны при вакуумной индукционной плавке коррозионностойких сплавов на никелевой и кобальтовой основе серии УСДП, выплавляемых для изготовления покрытий на лопатки с направленной кристаллической структурой в условиях ИЦ «Пратт и Уитни — Патон» [8; 9].



Рис. 1. Плавильный тигель типоразмера № 2

Целью работы является проведение сопоставительных испытаний в службе корундооксидцирконийсиликатных, муллитокорундовых и корундошпинельных тиглей, изготовляемых в ПАО «УКРНИИО ИМЕНИ А. С. БЕРЕЖНОГО», для выбора оптимального состава тигля, который обеспечит высокую стойкость и адсорбцию оксидных плен при плавке жаропрочных сплавов, предназначенных для изготовления пакетов рабочих и сопловых лопаток турбин двигателя судовых газотурбинных установок на ГП НПКГ «ЗОРЯ»-«МАШПРОЕКТ».

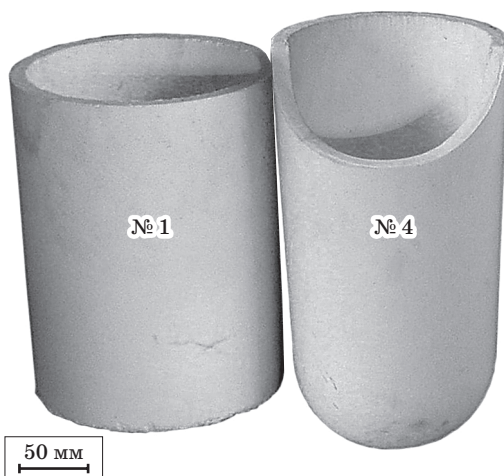


Рис. 2. Охранный и плавильный тигли типоразмеров № 1 и 4

Экспериментальная часть

Для проведения испытаний была изготовлена опытная партия охранных (типоразмер № 1) и плавильных (типоразмер № 4) тиглей (рис. 2). Охранные тигли изготовляли корундооксидцирконийсиликатного (марка КОЦСТ-60) и муллитокорундового (марка МКТ) составов; плавильные — корундооксидцирконийсиликатного, муллитокорундового и корундошпинельного (марка КШТ) составов. По показателям свойств и внешнему виду тигли отвечали требованиям ТУ У 23.2-00190503-371:2012 «Тигли высокоогнеупорные для плавки жаропрочных сплавов. Опытная партия. Технические условия». Фактические показатели свойств тиглей опытной партии приведены в табл. 1.

Тигли опытной партии поставили на испытания в условия ГП НПКГ «ЗОРЯ»-«МАШПРОЕКТ». Сопоставительные испытания проводили в вакуумно-индукционной установке УППФ-ЗМК при плавке жаропрочных сплавов на никелевой основе марок СМ88У-ВИ, СМ94-ВИ, СМ104-ВИ, ЭП648-ВИ, ЭИ417. Пространство между охранным и плавильным тиглем заполняли набивкой из корунда, по верхней части применяли

Фактические показатели свойств тиглей опытной партии

| Наименование свойств | Марка тигля | | |
|--|-------------|------|------|
| | КОЦСТ-60 | МКТ | КШТ |
| Массовая доля, %: Al ₂ O ₃ | 65,4 | 93,1 | 94,7 |
| ZrO ₂ | 24,7 | — | — |
| SiO ₂ | 10,9 | 5,9 | — |
| MgO | — | — | 4,9 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Пористость открытая, % | 12,1 | 13,4 | 16,5 |
| Предел прочности при сжатии, Н/мм ² | 244 | 163 | 168 |

теплоизоляционный материал. Установку комплекта тиглей в индуктор и прокалку производили согласно требованиям технологической инструкции на плавку в установке УППФ-ЗМК. Следует отметить, что прокалку тиглей осуществляли графитовыми электродами, размер которых не отвечал внутренним размерам поставленных опытных тиглей производства ПАО «УКРНИИО ИМЕНИ А. С. БЕРЕЖНОГО». Плавку сплавов осуществляли при следующих параметрах:

- температура заливки металла ~ 1560 °С;
- температура перегрева металла ~ 1630 °С;
- продолжительность плавки ~ 15—20 мин;
- вакуум $5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.

При проведении сопоставительных испытаний оценивали стойкость тиглей по количеству проведенных плавов, величину адсорбции оксидных плен (окисленных компонентов сплава) и характер разрушения плавильного тигля — по окончании испытаний.

Результаты и их обсуждение

Обобщенные результаты испытаний плавильных тиглей, согласно акту испытаний от ГП НПКГ «ЗОРЯ»-«МАШПРОЕКТ», приведены в табл. 2.

Причиной снятия тиглей с эксплуатации являлось постепенное превращение в трещины паутинообразных микротрещин по дну и вертикальных микротрещин по стенке тигля, образовавшихся, как правило, после прокалки. Коррозионно-эрозионного разъедания (за исключением образования шлаковой корочки) огнеупора в процессе плавки выявлено не было.

**Обобщенные результаты испытаний плавильных тиглей
при вакуумной индукционной плавке жаропрочных сплавов**

| Марка тигля | Марка сплава | Количество плавов | Причина снятия с эксплуатации |
|-------------|----------------------|-------------------|---|
| КОЦСТ | ЭП648-ВИ СМ94-ВИ | 22 | Постепенное превращение в трещины (до 2/3 высоты тигля) вертикальных микротрещин по стенке тигля, образовавшихся после проковки |
| | СМ88У-ВИ ЭИ417 | 16 | Постепенное превращение в трещины вертикальных микротрещин по стенке тигля, образовавшихся после проковки. На 17-й плавке металл просочился по трещинам на сливном носке |
| МКТ | СМ88У-ВИ СМ104-ВИ | 28 | Постепенное превращение в трещины паутинообразных микротрещин по дну и вертикальных микротрещин по стенке тигля, образовавшихся после проковки. На 29-й плавке по дну и радиусу перехода стенки в дно тигля металл просочился по трещинам |
| | СМ104-ВИ ЭП648-ВИ | 25 | Постепенное превращение в трещины паутинообразных микротрещин по дну, образовавшихся после 6-й плавки. На 26-й плавке металл просочился по трещинам по дну тигля |
| КШТ | СМ88У-ВИ ЭП648-ВИ | 28 | Постепенное превращение в трещины вертикальных микротрещин по стенке тигля, образовавшихся после проковки. После 28-й плавки увеличились трещины на сливном носке, что привело к его разрушению |
| | СМ104-ВИ ЭП648-ВИ | 23 | Постепенное превращение в трещины вертикальных микротрещин по стенке тигля у сливного носка, образовавшихся после проковки. После 23-й плавки тигель разрушился со стороны сливного носка |

Следует отметить, что при плавке всех сплавов в плавильных тиглях всех марок адсорбция оксидных плен сплава характеризовалась как удовлетворительная. После механической чистки шлаковой корочки, образовавшейся в результате адсорбции оксидных плен на границе расплавленного металла, открывшиеся раковинки обозначены как незначительные. Средняя стойкость плавильных тиглей уменьшается в следующем ряду: МКТ (27) \geq КШТ (26) > КОЦСТ (19).

В целом, в результате сопоставительных испытаний установлено, что тигли марок КШТ и МКТ показали практически равную среднюю стойкость наравне с удовлетворительной

адсорбцией оксидных плен и могут быть рекомендованы для плавки жаропрочных сплавов на никелевой основе в условиях ГП НПКГ «ЗОРЯ»-«МАШПРОЕКТ».

Выводы

Проведены сопоставительные испытания в службе корундо-оксидцирконийсиликатных, муллитокорундовых, корундошпинельных тиглей, изготавливаемых в ПАО «УКРНИИО ИМЕНИ А. С. БЕРЕЖНОГО», при плавке никелевых жаропрочных сплавов, предназначенных для изготовления пакетов рабочих и сопловых лопаток турбин двигателя судовых газотурбинных установок в условиях ГП НПКГ «ЗОРЯ»-«МАШПРОЕКТ». Установлено, что коррозионно-эрозионное разъедание огнеупора в процессе и по окончании плавки не выявлено, при плавке всех сплавов в плавильных тиглях всех марок адсорбция оксидных плен сплава характеризуется как удовлетворительная, а средняя стойкость плавильных тиглей уменьшается в следующем ряду: МКТ (27) \geq КШТ (26) $>$ КОЦСТ (19). Учитывая практически равную среднюю стойкость тиглей марок КШТ и МКТ, они рекомендуются для плавки вышеуказанных никелевых жаропрочных сплавов.

Библиографический список

1. Изготовление опытных периклазосодержащих тиглей и их испытание при вакуумной плавке жаропрочных сплавов / В. В. Примаченко, В. А. Устиченко, С. В. Чаплинко [и др.] // Технология и применение огнеупоров и техн. керамики в пром-сти: междунар. науч.-техн. конф., Харьков, 23—24 апр. 2003 г. : тез. докл. — Х. : Каравелла, 2003. — С. 17.
2. *Примаченко В. В.* Производство и применение вибролитых корундошпинельных и корундопериклазовых тиглей для плавки жаропрочных сплавов / В. В. Примаченко, В. А. Устиченко, С. В. Чаплинко // Новые огнеупоры. — 2005. — № 4. — С. 36—37.
3. Corundum based crucibles for induction melting of heat-proof alloys / V. Primachenko, V. Ustichenko, S. Chaplianko // Stahl und Eisen. — 2006. — Spec. iss. — P. 52—54. (Proc. 49-th Int. Coll. on Refractories. Refractories for Metallurgy, Aachen, Germany, 7—8 Nov. 2006).
4. Studying of high-alumina and Al_2O_3 —MgO crucibles interaction with heat-proof alloys based on nickel and cobalt / V. Primachenko, V. Martynenko, I. Shulik [et al.] // Refractories Worldforum. — Germany, 2012. — Vol. 4, № 3. — P. 106—110.
5. 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. Сопоставительные испытания в службе муллитокорундовых и корундошпинельных тиглей при плавке жаропрочных сплавов / В. В. Примаченко, В. А. Устиченко, Л. М. Колесников [и др.] // Технология и применение огнеупоров и техн. керамики в пром-сти : междунар. науч.-техн. конф., Харьков, 24—25 апр. 2001 г. : тез. докл. — Х. : Каравелла, 2001. — С. 6—7.

7. Высокостойкие корундошпинельные тигли для плавки жаропрочных сплавов / [В. В. Примаченко, В. А. Устиченко, Л. В. Белик, С. В. Чаплянко] // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов : XVI науч.-техн. конф., Обнинск, 7—9 дек. 2001 г. : тез. докл. — Обнинск : ОНПП Технология, 2001. — С. 35—36.

8. 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.-техн. конф., Харьков, 16—17 апр. 2013 г. : тез. докл. — Х. : Оригинал, 2013. — С. 6—7.

9. Сопоставительные испытания корундопериклазовых и корундооксидцирконийсиликатных тиглей в службе при индукционной вакуумной плавке коррозионностойких сплавов / В. В. Примаченко, В. В. Мартыненко, И. Г. Шулик [и др.] // 36. наук. пр. ПАТ «УКРНДІ ВОГНЕТРИВІВ ІМ. А. С. БЕРЕЖНОГО». — Х. : ПАТ «УКРНДІ ВОГНЕТРИВІВ ІМ. А. С. БЕРЕЖНОГО», 2014. — № 114. — С. 3—8.

Рецензент канд. техн. наук Хончик И. В.