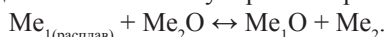


# Оценка степени взаимодействия жаропрочного никелевого сплава с материалом формы при вакуумной выплавке\*

Большинство из используемых в газотурбостроении жаропрочных сплавов на никелевой основе содержат высокие концентрации активных элементов, таких как алюминий, титан, железо и другие, которые легко вступают во взаимодействие с кислородом воздуха. По этой причине исключительно вакуумная выплавка и заливка в формы могут обеспечить получение качественного литья.

Шихтовые материалы, особенно вторичные, используемые при переплаве таких сплавов, не должны содержать оксидных пленок и других загрязнений, так как это может вызвать образование плен на поверхности расплава в процессе плавки, загрязнение металла отливки и, как следствие, ухудшение эксплуатационных характеристик получаемых деталей.

Реакции на границе металл-огнеупор (как правило, корунд, а в качестве связующего – гидролизированный этилсиликат) в процессе заливки и кристаллизации сплава могут приводить к образованию газообразных либо конденсированных продуктов взаимодействия. Элементы, не образующие газообразных оксидов, могут взаимодействовать с огнеупорами по реакции замещения



Продукты реакции при этом могут оставаться на стенках огнеупора, препятствуя развитию дальнейшего взаимодействия между металлом и огнеупором, либо отслаиваться из-за разницы в коэффициентах термического расширения между огнеупором и продуктами взаимодействия. Образование газообразных продуктов может смещать равновесие реакции металл-оксид, что вызовет диффузию кислорода из огнеупора в расплав. Во многих случаях применяемые огнеупоры содержат примеси (натрий, калий), химически взаимодействующие с расплавляемым металлом, что приводит к загрязнению сплава.

Для оценки межфазного взаимодействия расплава с огнеупором были использованы методы определения краевого угла смачивания и работы адгезии [1]. Исследование межфазного взаимодействия проводили в вакууме ( $P = 1,7 \cdot 10^{-2}$  Па). В результате экспериментов получены эмпирические уравнения поверхностного натяжения в интервале температур 1673–2023 К, а также температурные и временные зависимости контактных углов смачивания и работы адгезии в системах оксид-жаропрочный сплав.

В данной работе проводили исследования межфаз-

Проведено исследование межфазного взаимодействия расплава ЧС70 со стандартной литейной формой основе корунда и литейной формой основе корунда, модифицированного алюминием, при выплавке деталей ГТД. Сравнительный анализ полученных механических характеристик и глубины измененного слоя жаропрочного сплава показал эффективность при выплавке деталей ГТД модифицирования керамических форм на основе корунда

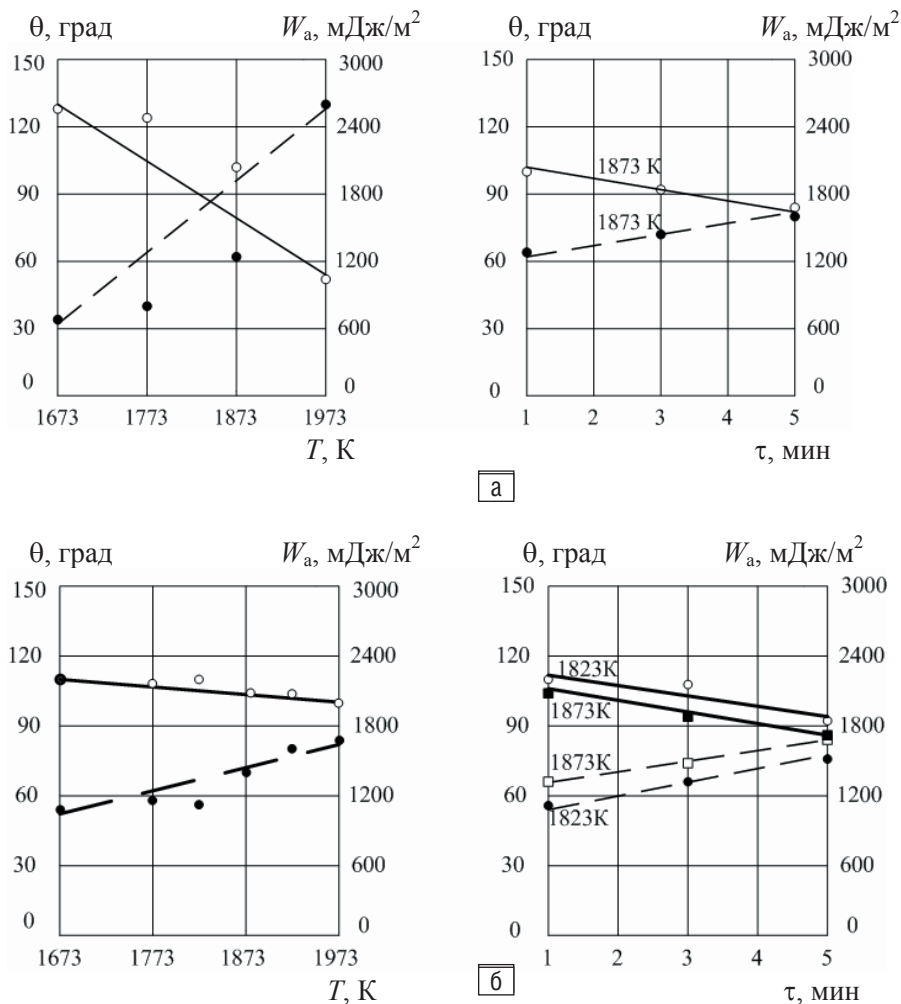
ного взаимодействия расплава ЧС70 [2] с образцами литейных форм, изготовленных по выплавляемым моделям. В качестве материала формы в одном случае использовали формы, сделанные по промышленной технологии (корунд, в качестве связующего – гидролизированный этилсиликат – ГрЭТС [3] (рис. 1, а), а во втором варианте – разработанные нами формы на основе корунда и ГрЭТС с использованием модифицирующих добавок (в данном случае – тонкодисперсный порошок алюминия, рис. 1, б). В обоих случаях наблюдается уменьшение контактных углов смачивания и увеличение работы адгезии с повышением температуры. Однако, у образца форм на основе корунда с ГрЭТС без модификатора контактный угол смачивания уменьшается на большую величину, вследствие чего при температуре выше 1873 К капля практически теряет форму и растекается, что свидетельствует об интенсивном взаимодействии этих образцов с расплавом.

Наряду с лабораторными, были проведены опытно-промышленные исследования взаимодействия литейных форм на основе корунда без модификатора и с модификатором в производственных условиях.

В формы, нагретые до 1073 К, заливали сплав ЧС70 при температуре 1853 К. Оценка степени взаимодействия расплав-форма проводили по глубине измененного (обедненного) слоя на отливке. Химический состав керамических материалов и образцов сплавов, а также особенности микроструктуры изучали методом микро-рентгеноструктурного анализа (МРСА) на установке JEOL «Superprobe-733».

Исследование макро- и микроструктуры, расчет неметаллических включений проводили методом оптической металлографии с помощью оптического микроскопа «Neofot-2» в обычном и поляризованном свете. Результаты исследований показали, что на поверхности отливок наблюдается зона, в которой карбиды практически отсутствуют. Поскольку карбидная фаза в сплаве ЧС70 состоит из карбидов на основе титана и хрома, то это свидетельствует как об обезуглероживании поверхности, так и обеднении титаном и хромом приповерхностной зоны. В контактной зоне обнаружено также снижение алюминия, что может свидетельствовать об уменьшении массовой доли упрочняющей  $\gamma'$ -фазы  $\text{Ni}_3\text{Al}$  (Ti). При этом

\* Работа выполнена под руководством Симановского В. М.



алюминием. Результаты проведенных испытаний механических характеристик показали, что до 973 К обеднение контактной зоны основными легирующими элементами не оказывает существенного влияния на длительную прочность полученных образцов. Однако, при более высоких температурах испытания наблюдается снижение длительной прочности при увеличении глубины обедненной зоны. Это снижение связано с понижением в поверхностном слое отливки содержания компонентов сплава алюминий-титан-хром, ответственных за оба вида упрочнения сплава – карбидной и интерметаллидной. С увеличением глубины измененного слоя жаропрочность сплава снижается.

Анализ результатов испытаний на усталостную прочность образцов, залитых в экспериментальные формы, описанные выше, показал, что сопротивление усталости имеет явную зависимость от глубины измененного слоя. Литые образцы с глубиной измененного слоя 120 мкм имели предел выносливости на базе  $10^6$  циклов 470 МПа, а у образцов с глубиной измененного слоя 30 мкм – 530 МПа.

## Вывод

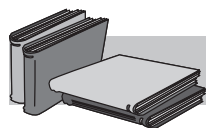
Таким образом, материалом формы (особенно для получения лопаток методом направленной кристаллизации, где требуется длительная инертность к расплаву) можно рекомендовать корунд, модифицированный алюминием [4]. Алюминий, соединяясь с выделившимся из этилсиликата слабоструктурированным  $\text{SiO}_2$ , образует муллит, который является химически достаточно инертным соединением. Это позволяет исключить взаимодействие расплава при длительном контакте с формой при температуре 1723–1773 К.

**Рис. 1.** Температурные и временные зависимости контактного угла смачивания и работы адгезии расплава на подложках образца литейной формы на основе корунда и ГрЭТС без модификатора (а) и образца литейной формы на основе корунда и ГрЭТС, модифицированного алюминием (б). [1]  
 — — — — — контактный угол смачивания;  
 - - - - - работа адгезии

глубина измененной контактной зоны отливки, залитой в корундовую форму, составляет 30–35 мкм, а в корундовую форму с модификатором – 5–7 мкм.

Для изучения влияния глубины измененного слоя на механические характеристики сплава жаропрочный сплав заливали в стандартные керамические формы как на основе корунда, так и на основе корунда, модифицированного

глубина измененной контактной зоны отливки, залитой в корундовую форму, составляет 30–35 мкм, а в корундовую форму с модификатором – 5–7 мкм.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Верховлюк А. М. Межфазное взаимодействие жаропрочного никелевого сплава с оксидами // Адгезия расплавов и пайка материалов. – 2002. – Вып. 35. – С. 80–84.
2. Инструкция и ЖАКИ. 105.509-2001: Сплавы жаропрочные литейные для лопаток газовых турбин (Паспорт сплава ЧС70ВИ).
3. Инструкция. Система качества. Отливки из сталей и сплавов по выплавляемым моделям. Технические требования. Контроль и правила приемки: И 255.105.059-86: Введена на НПК «Машпроект», 1986: Переизд. в 2001. – Николаев, 2001. – 20 с.
4. Пат. 1888, Украина, МПК В22С1/00. Суміш для виготовлення ливарних форм: В. М. Сімановський; Ю. Г. Квасницька, В. Г. Єфімова, Г. В. Єфімов, І. І. Максютя, ФТІМС НАНУ. – № 2000606664; Опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11. – 4 с.

## Summary

Iu. G. Kvasnytska

The estimation of superalloy level interaction with the mould material at vacuum melting

The investigation of interphase interaction of the CHS70 superalloy melt with standard mould on the base of corundum and mould on the base of corundum that inoculated by aluminum was realized. Comparative analysis of mechanical properties and depth of modify layer in CHS70 superalloy is showed the effectiveness of ceramics moulds inoculation