

---

# Коррозионная стойкость сплавов семейства «Хастеллой» в хлоралюминатных расплавах

---

**Карпов В.В.,\* Баженов А.В., Абрамов А.В., Половов И.Б., Ребрин О.И.**

*ФГАО ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19. Факс: +7(343)374-54-91, тел: +7(343)375-41-51; E-mail: polovov@dpt.ustu.ru*

Изучена коррозия сплавов Hastelloy S, Hastelloy X, Haynes 230, Hastelloy N, Hastelloy G35 и Hastelloy C2000 в расплавах  $KCl-AlCl_3$  при 550 °С. Определены скорости и механизмы коррозии исследуемых материалов в данных условиях. Исследованы процессы, протекающие в ходе контакта сплавов с хлоралюминатными электролитами.

---

## **Введение**

Энергетические реакторы на быстрых нейтронах с жидкосолевым теплоносителем относятся к совершенно новому поколению безопасных ядерных реакторов, в которых может быть использовано как урановое, так и ториевое ядерное топливо. Однако внедрение ядерно-энергетических установок на основе расплавленных солей сдерживается рядом проблем, наиболее важной из которых является необходимость разработки новых, либо совершенствование существующих конструкционных материалов, сохраняющих стойкость в крайне агрессивных условиях высокотемпературных расплавленных сред.

## **Экспериментальная часть**

Данная работа нацелена на комплексное исследование процессов взаимодействия жаропрочных сплавов Hastelloy S, Hastelloy X,

Haynes 230 и коррозионностойких сплавов Hastelloy N, Hastelloy G35 и Hastelloy C2000 с хлоралюминатными расплавами. Применение последних считается перспективным для организации второго контура теплоносителя жидкосолевых ядерно-энергетических установок. Коррозионное поведение материалов изучено при температуре 550 °С в электролитах  $KCl-AlCl_3$  с мольным отношением  $Al : K$ , равным 1.1. В работе использован комплекс независимых способов исследования: гравиметрический метод, металлографический анализ (Olympus GX-71F), электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ (JSM 6490, ZEISS CrossBeam AURIGA). В дополнение к изучению структуры тестируемых материалов осуществляли химический анализ закаленных после коррозионных испытаний проб электролитов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с

индуктивно-связанной плазмой (Optima 2100DV).

## Результаты и их обсуждение

Скорости коррозии исследуемых материалов в расплаве  $KCl-AlCl_3$  при соотношении  $Al/K = 1.1$  после 100 часов выдержки при  $550\text{ }^\circ C$  приведены в таблице 1.

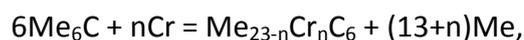
Таблица 1.

Скорости коррозии сплавов типа «Хастеллой» в расплаве  $KCl-AlCl_3$  при  $550\text{ }^\circ C$

Марка сплава	Скорость коррозии		Глубина проникновения коррозии, мкм
	г/(м <sup>2</sup> ·ч)	мм/год	
X	0.8±0.2	0.9±0.2	55–65
S	0.8±0.1	0.8±0.1	18–24
230	0.8±0.2	0.8±0.2	27–32
N	0.6±0.1	0.6±0.1	—
G35	1.4±0.3	1.4±0.3	—
C2000	1.6±0.3	1.7±0.3	—

Нами установлено, что жаропрочные сплавы Hastelloy X, Hastelloy S и Haynes 230 после выдержки в хлоралюминатных расплавах подвержены межкристаллитной коррозии (МКК). При металлографическом травлении<sup>1</sup> прокорродировавших образцов на их поверхности отчетливо наблюдаются сплошные цепочки вторичных избыточных фаз по границам зерен (рисунок 1).

Результаты рентгеновского микроанализа показали, что вдоль границ зерен концентрация хрома падает на 20 %, а непосредственно на границах зерен резко возрастает. Это указывает на образование по границам зерен цепочек избыточных карбидов хрома. В жаропрочных сплавах образование карбидных фаз по границам зерен протекает преимущественно в результате «перерождения» первичных карбидов вследствие термовлияния<sup>2</sup>:



Это приводит к образованию микрогальванопар и последующему растворению их анодных зон. Протекающие данные процессы обуславливают развитие в жаропрочных сплавах типа «Хастеллой» процессов МКК.

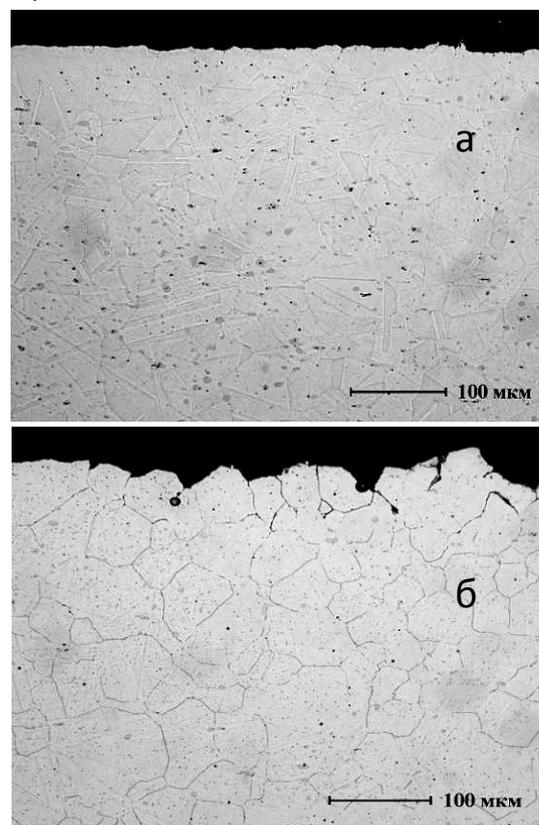


Рис.1. Образование избыточных фаз в сплаве Hastelloy X после контакта с расплавом  $KCl-AlCl_3$  в течение 100 ч при  $550\text{ }^\circ C$  (а – состояние поставки, б – после выдержки в расплавленном электролите)

Таким образом, несмотря на относительно низкие интегральные скорости коррозии жаропрочных сплавов Hastelloy X, Hastelloy S и Haynes 230 в хлоралюминатных электролитах при  $550\text{ }^\circ C$ , их использование в качестве конструкционных материалов в данных условиях не рекомендуется в силу склонности к МКК.

Характер разрушения поверхности коррозионностойких никель-хром-молибденовых сплавов (Hastelloy N, Hastelloy G35, Hastelloy C2000) после выдержки в  $KCl-AlCl_3$  при  $550\text{ }^\circ C$  – сплошной,

неравномерный (рисунок 2). Имеющие место локальные зоны повышенной коррозии связаны со структурной неравномерностью материалов и наличием в них дефектных зон.

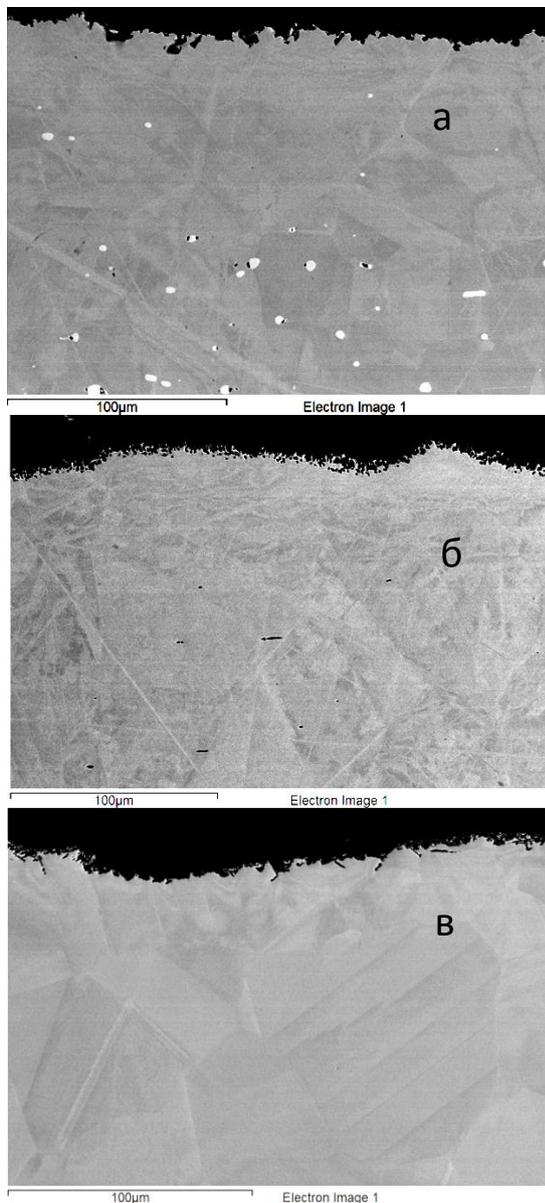


Рис.2. Микроструктура образцов сплавов после 100 ч выдержки в KCl–AlCl<sub>3</sub> при 550 °С (а – Hastelloy N, б – Hastelloy G35, в – Hastelloy C2000)

Металлографический анализ и травление с целью выявления межкристаллитных сегрегаций показали, что после 100 часов выдержки образцов вторичные фазы на границах зерен имеют малые размеры и разобщены (рисунок 3). Увеличение концентрации существующих включений в объеме образцов также не выявлено

Скорость коррозии сплавов Hastelloy N, G35 и C2000 определяется окислительно-восстановительными процессами, в результате которых ионы солевой среды окисляют наиболее электроотрицательные компоненты сплава, такие как хром, марганец и железо.

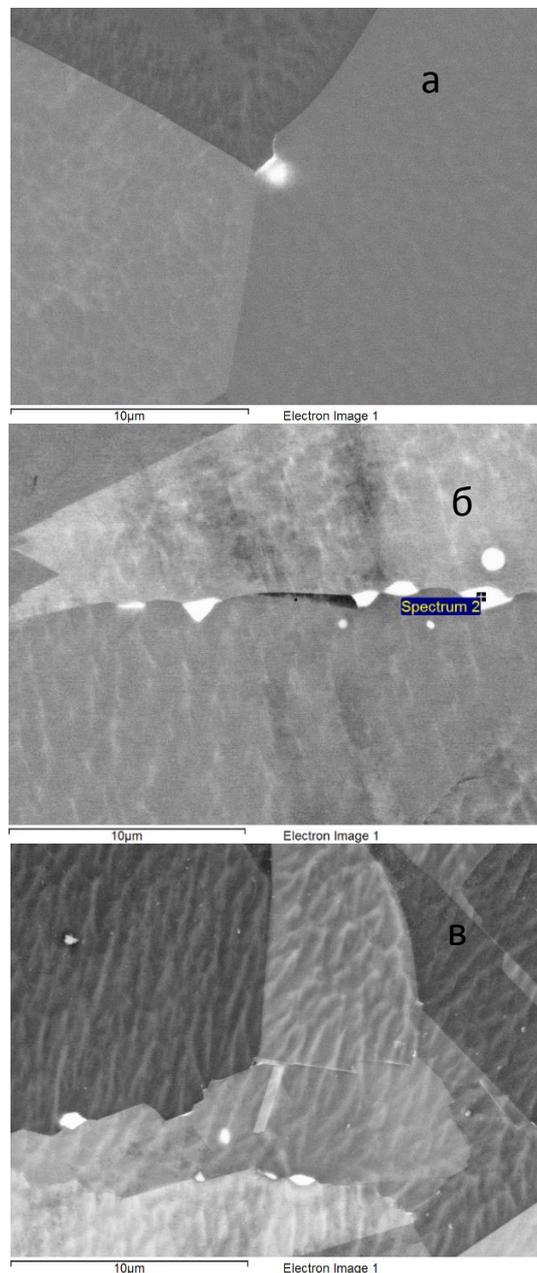


Рис.3. Образование избыточных фаз в коррозионно-стойких никелевых сплавах после 100 ч выдержки в KCl–AlCl<sub>3</sub> при 550 °С (а – Hastelloy N, б – Hastelloy G35, в – Hastelloy C2000)

Вывод о преимущественном растворении в ходе выдержке в расплаве KCl–AlCl<sub>3</sub> наиболее электроотрицательных компонентов сплавов Hastelloy N, Hastelloy

G35 и Hastelloy C2000 (хрома, марганца и железа) подтвержден данными химического анализа замороженных пластов электролитов, полученных после коррозионных испытаний.

Увеличение продолжительности контакта с хлоралюминатными электролитами до 500-1000 ч приводит к значительному уменьшению скорости коррозии исследуемых коррозионностойких сплавов семейства «Хастеллой». С одной стороны это вызвано замедленной диффузией электроотрицательных компонентов сплавов из объема зерен к границе электролит|сплав и низкой скоростью отвода продуктов коррозии через расплав, насыщенный по этим элементам. Кроме того, на поверхности сплавов нами зафиксировано образование слоя из некорродирующих компонентов – молибдена и никеля. Можно обосновано предположить, что образующееся в ходе коррозии покрытие может оказывать защитное действие и предохранять

конструкционный материал от дальнейшего разрушения.

Таким образом, при использовании коррозионностойких никель-хром-молибденовых сплавов (Hastelloy N, Hastelloy G35, Hastelloy C2000) возможно количественное прогнозирование процессов коррозии. Представляет несомненный интерес изучение возможности организации защиты материалов за счет «самопассивации» их поверхности электроположительными компонентами сплавов.

### **Библиографический список**

- 1 Беккерт М., Клемм Х. *Справочник по металлографическому травлению*. М.: Металлургия, **1979**. 336 с.
- 2 Симс Ч.Т., Столофф Н.С., Хагель У.К. *Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок*. М.: Металлургия, **1985**. Кн. 1. 384 с.