
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 жидкосолевыми 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.

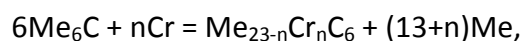
Таблица 1.

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 ² ·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 травлении¹ 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 термовлияния²:



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

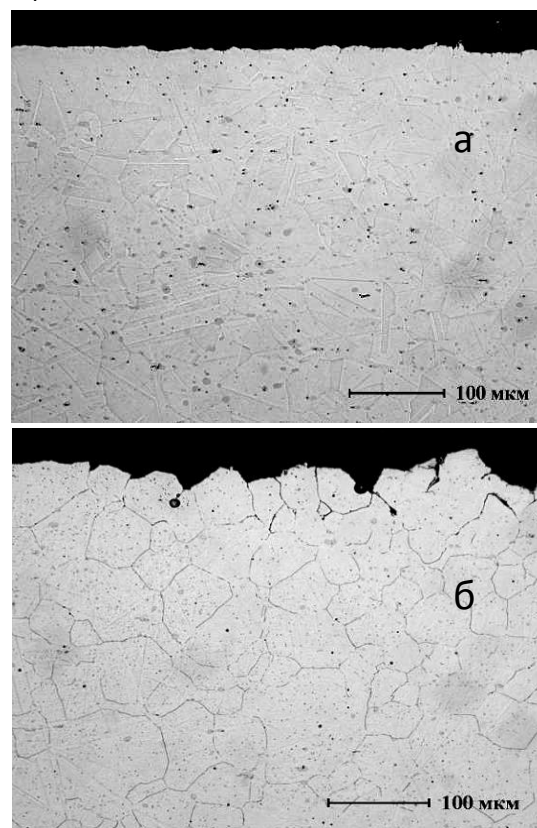


Рис.1. Образование избыточных фаз в сплаве Hastelloy X после контакта с расплавом $KCl-AlCl_3$ в течение 100 ч при $550\text{ }^\circ C$ (а – состояние поставки, б – после выдержки в расплавленном электролите)

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.

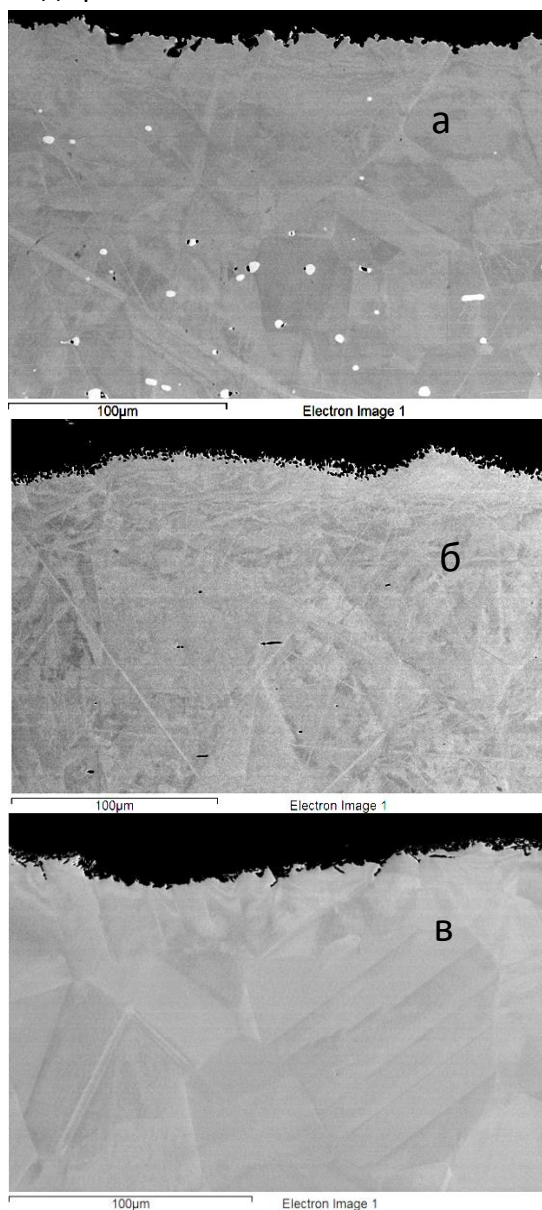


Рис.2. Микроструктура образцов сплавов после 100 ч выдержки в $KCl-AlCl_3$ при $550\text{ }^\circ C$ (а – Hastelloy N, б – Hastelloy G35, в – Hastelloy C2000)

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.

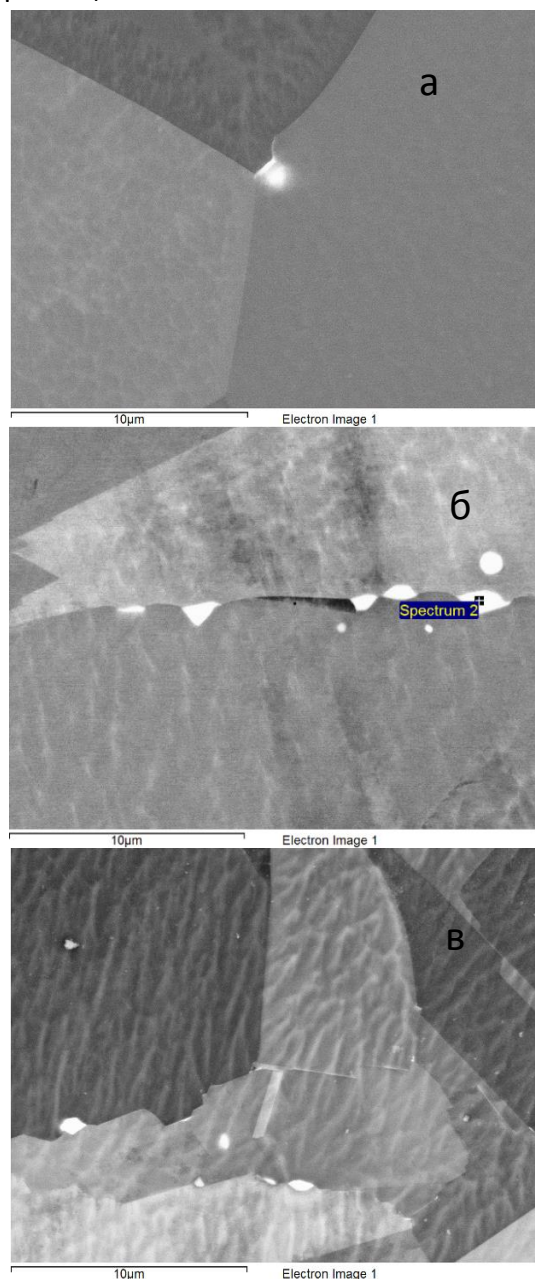


Рис.3. Образование избыточных фаз в коррозионно-стойких никелевых сплавах после 100 ч выдержки в $KCl-AlCl_3$ при $550\text{ }^\circ C$ (а – Hastelloy N, б – Hastelloy G35, в – Hastelloy C2000)

Вывод о преимущественном растворении в ходе выдержке в расплаве $KCl-AlCl_3$ 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.