

В последние годы исследователи сосредоточили свое внимание на жаростойких сплавах, в том числе, с общим составом Fe-Cr-Al и Ni-Cr-Al [1-5]. Для стойкого к окислению суперсплава необходимо и важно иметь хороший и стойкий к окислению при высоких температурах оксидный слой, который должен быть плотным, непрерывным, стабильным, и иметь медленный темп роста. Такие сплавы имеют высокие защитные свойства вследствие оксидов переходных металлов Cr₂O₃ и Al₂O₃. Систематические исследования поведения нанокристаллических алюминий- и хромсодержащих сплавов при высокотемпературном окислении были выполнены Вонгом с соавторами [3,6-8]. Установлено, что стойкость таких сплавов к окислению может быть улучшена путем нанокристаллизации. Одним из перспективных способов компактирования с сохранением наноструктуры является процесс, обладающий очень высокой скоростью нагрева и короткими циклами спекания, которые позволяют консолидировать порошки без роста частиц. Поскольку в настоящее время актуален синтез высокодисперсных прекурсоров для последующего изготовления компактных образцов различными методами представляет интерес получения порошковой системы Fe-Cr-Al на основе элементарных металлов электрохимическим путем [9]. Компактирование образцов дисперсной системы Fe-Cr-Al (рис.1), полученной электрохимическим способом [10], проводили с помощью искрового плазменного спекания в графитовой пресс-форме на установке 10-3, Thermal Technology LLC (Santa Rosa, California) при давлении 60 МПа, температуре 1200°C, вакууме 10⁻² Па, время спекания - 30 мин. Принципиальная схема лабораторной установки представлена на рис.2. Далее объемные образцы исследовали рентгенофлуоресцентным и рентгенофазовым методами анализа на установках D2 PHAZER (Bruker) и CYP-02 Реном ФВ, на предмет получения информации о фазовом и элементном составе. Результаты рентгенографического анализа подтверждали независимыми измерениями на дифрактометре ДРОН-7 с использованием программного продукта MAUD. Кроме того, с помощью микротвердомера Shimadzu HNV-2 измеряли твердость образцов по Виккерсу. Рис. 1 - Микрофотография частиц дисперсной системы Fe-Cr-Al Для анализа распределения содержания фаз по глубине перед каждым измерением проводили последовательное удаление слоев материала путем механического шлифования на станке MetaServ 250 (Buehler). Рис. 2 - Принципиальная схема SPS-установки Микросъемку частиц полученных осадков проводили на сканирующем электронном микроскопе Mini-SEM SX-3000 (EVEX). Экспериментально установлено, что дисперсный образец-предшественник, полученный электрохимическим путем, имеет элементный состав, % масс.: Al - 9,0, Fe - 90,5, Cr - 0,5. Экспериментальные данные исследования объемных образцов на основе системы Fe-Cr-Al представлены в таблице 1. Таблица 1 - Результаты исследования компактных образцов системы Fe-Cr-Al Глубина слоя на расстоянии от исходной поверхности, мкм Содержание фаз, % масс. (ОКР, нм)

Микротвердость HV0.2 Группа интерметаллических фаз (Fe_2AlCr , $(\text{Al}_{0,5}\text{Cr}_{0,5})\text{Fe}$)
Карбиды ($\text{AlFe}_3\text{C}_{0,5}$) Al/ α - Al_2O_3 0 54,2 (27) 21,9 (15) 23,9 (100) 514 -100 54,2 (27)
21,9 (15) 23,9 (100) 514 -200 69 (25) 20,0 (27) 11,0 (200) 430 -550 77,6 (22) 11,8
(35) 10,5 (200) 360 Плотность исследуемого объекта составляет 6,46 г/см³, а
после удаления поверхностного слоя толщиной в 550 мкм - 6,47 г/см³, что
свидетельствует о упорядоченном чередовании фаз в образце. Очевидно, что
оксидная (α - Al_2O_3) и карбидная фазы, расположены по направлению от
поверхности к центру образца в убывающем по количественному содержанию
порядке (табл.1), что обусловлено особенностями SPS-компактирования.
Напротив, содержание интерметаллидных фаз возрастает по мере удаления от
поверхности образца. Твердость по Виккерсу падает в направлении от
поверхности к центру образца, что также преимущественно связано с
концентрированием карбидов и оксидов, обеспечивающих наивысшую твердость
в приповерхностных слоях объемного образца (табл.1). Таким образом,
полученные электрохимическим способом предшественники, представляющие
собой твердый раствор элементных металлов, могут в процессе спекания в
условиях вакуума образовывать указанные выше интерметаллиды и карбиды
разного фазового состава. Введение хрома в количестве $\leq 0,5$ % масс.
способствует повышению микротвердости исследуемых объектов примерно в 1,5
раза по сравнению с микротвердостью бинарных Fe-Al образцов