

Влияние зернограничной σ -фазы на закономерности водородного охрупчивания многокомпонентного сплава CoCrFeMnNi^*

А.С. Нифонтов¹, Е.Г. Астафурова¹

¹ *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия*

Установлено влияние электролитического наводороживания на механические свойства и механизм разрушения многокомпонентного сплава Кантора CoCrFeMnNi с разной микроструктурой. Показано, что формирование частиц зернограничной σ -фазы и, как следствие, создание дополнительных границ раздела «частица/матрица» способствуют повышению устойчивости сплава Кантора к водородному охрупчиванию с точки зрения макромеханического поведения. Выявлены основные факторы, определяющие толщину хрупких поверхностных зон, формирующихся при наводороживании и последующем одноосном растяжении наводороженных образцов, а также установлены микромеханизмы их разрушения. Показано, что формирование частиц зернограничной σ -фазы повышает диффузионный транспорт водорода вдоль границ раздела во время пластической деформации, обеспечивая формирование вторичных трещин в центральной части образца, при этом дислокационный транспорт водорода в гетерофазных образцах оказывается подавленным.

Ключевые слова: водород, водородное охрупчивание, высокоэнтропийный сплав, сплав Кантора, электролитическое наводороживание.

Введение

Негативному влиянию водорода (водородному охрупчиванию (ВО)) подвержены конструкционные металлические материалы, используемые в различных отраслях промышленности: энергетике, авиации и транспорте [1, 2]. Данный эффект сдерживает развитие относительно нового, но активно развивающегося направления – водородной энергетики. В этой отрасли существует потребность в решении вопросов создания инфраструктуры для безопасного хранения и транспортировки водорода. Поэтому поиск новых материалов конструкционного и функционального назначения, которые могут быть использованы при эксплуатации в водородосодержащих средах, остается важной задачей для материаловедения и физики твердого тела. В качестве материалов для создания контейнеров и/или ответственных узлов конструкций в водородной энергетике используются наиболее устойчивые к ВО аустенитные нержавеющие стали (АНС) [3, 4]. При этом Джао Ю. с соавт. [5, 6] показали, что разработанные в 2004 г. высокоэнтропийные многокомпонентные сплавы (ВЭС) с ГЦК (ГЦК – гранецентрированная кубическая), кристаллической решеткой в ряде случаев демонстрируют большую устойчивость к ВО, чем АНС. То есть такие сплавы можно рассматривать как перспективные для использования в водородосодержащих средах. В частности, наиболее популярный среди ВЭСов сплав Кантора (CoCrFeMnNi), помимо устойчивости к ВО, обладает высокими коррозионными свойствами, превосходной пластичностью при комнатной и криогенных температурах [7, 8].

Существующие к настоящему времени работы о водородно-индуцируемых эффектах в сплаве Кантора показывают, что его поведение в водородосодержащих средах во многом похоже на поведение АНС, но имеются различия. Так же как и для традиционных сплавов, для понимания эффектов водородной хрупкости прежде всего необходимо получить данные о растворимости водорода в кристаллической решетке и структуре новых сплавов, путях его диффузии, о влиянии на механические характеристики и механизмы охрупчивания. Однако для сплава Кантора пока еще нет полного понимания данных процессов и механизмов [4, 9, 10]. Но сейчас уже понятно, что особенности ВО многокомпонентных систем вызваны сильным искажением кристаллической структуры и механизмами деформации (дислокационное скольжение и двойникование) [10].

Известно, что микроструктура является одним из ключевых параметров, который оказывает влияние на склонность материала к ВО. Одним из используемых методов повышения устойчивости к индуцированному водородом хрупкому разрушению в традиционных сплавах является измельчение зеренной структуры, он основан на формировании высокой плотности границ зерен –

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00261, <https://rscf.ru/project/20-19-00261/>.