УДК 538.951

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА КАНТОРА

А.С. Нифонтов^{1,2}, М.Ю. Панченко², Е.А. Загибалова^{1,2}
Научный руководитель: доцент, д.ф.-м.н. Е.Г. Астафурова
¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050
²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055
Е-mail: <u>asn42@tpu.ru</u>

EFFECT OF DISPERSED PARTICLES ON FEATURES OF HYDROGEN EMBRITTLEMENT OF HIGH-ENTROPY CANTOR ALLOY

A.S. Nifontov^{1,2}, M.Yu. Panchenko², E.A. Zagibalova^{1,2} Scientific Supervisor: Assistant Professor, Dr., E.G. Astafurova ¹National Research Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050 ²Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russia, Tomsk, Akademichesky pr. 2/4, 634055 E-mail: asn42@tpu.ru

Abstract. Features of hydrogen embrittlement of high-entropy CoCrFeMnNi alloy after age-hardening at temperature of 900°C for 1 h were investigated. It was shown that σ -phase precipitates are formed along the grain boundaries in the specimens after age-hardening. The precipitation of grain boundary σ -phase particles contributes to a decrease in the thickness of the brittle hydrogen-induced layer and the hydrogen embrittlement index in aged specimens compared to the initial single-phase specimens of the Cantor alloy.

Введение. В данный момент внимание исследований приковано к новому классу материалов высокоэнтропийным сплавам (ВЭС). Одним из известных представителей ВЭС с ГЦК решеткой является эквиатомный сплав CoCrFeMnNi (сплав Кантора) [1]. Основной особенностью данного сплава является: его структура – однофазный неупорядоченный твердый раствор, сохраняющий высокую пластичность и вязкий характер разрушения при испытаниях на одноосное растяжение от комнатной до криогенных температур [2]. В настоящее время в литературе мало исследований по воздействию водорода на высокоэнтропийный сплав Кантора и их результаты противоречивы. Было показано, что при термообработках или горячей прокатке в сплаве Кантора возможно выделение частиц вторичных фаз (L1₀, B2, σ), которые могут изменять его механические свойства [3]. Известно, что вторичные фазы в сталях могут являться ловушками для водорода, способствуя тем самым устойчивости к эффекту водородного охрупчивания [4]. Поэтому цель данной работы – установить влияние дисперсионного твердения на закономерности водородного охрупчивания высокоэнтропийного сплава Кантора.

Методы исследования. В качестве материала для исследования был выбран многокомпонентный высокоэнтропийный сплав Кантора (ВЭС) с ГЦК решёткой. Химический состав исследуемого сплава: Fe-19,8 Mn-19,5 Cr-18,6 Ni-21,0 Co-21,1 (масс. %). Для получения гомогенного твердого раствора была

ХІХ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК» 147

проведена термомеханическая обработка (ТМО) сплава, включающая отжиги и прокатку (И-ВЭС). Часть образцов после ТМО подвергли старению при температуре 900°С в течение 1 часа (С-ВЭС). Наводороживание образцов производили электролитическим методом при плотности тока $j_H = 10$ мА/см² в течение 50 часов при комнатной температуре в 3%-водном растворе NaCl в присутствии 3 г/л NH₄SCN в качестве катализатора. Поверхности разрушения образцов были изучены методом растровой электронной микроскопии (РЭМ, микроскоп LEO EVO 50, Zeiss). Исследование микроструктуры проводили с помощью светового микроскопа (СМ, микроскоп Altami MET 1C).

Результаты. На рисунке 1 *a*, δ приведены СМ-изображения поверхности И-ВЭС и С-ВЭС образцов (зёренная структура выявлена химическим травлением). Оба состояние крупнокристаллические с размером зерна около 200 мкм. На рисунке 1 *a*, δ присутствует большое количество двойников отжига. Границы образцов С-ВЭС вытравились сильнее (рис 1 δ), что свидетельствует о выделении зернограничной фазы, появившейся вследствие старения образцов. Анализ СМ-изображений и электронно-микроскопические исследования показали, что И-ВАС образцы обладают однофазной аустенитной структурой, а в С-ВЭС образцах наблюдается выделение пластинчатой интерметаллидной σ -фазы по границам зерен (рис 1 *в*). Размер пластин не превышает 80-150 нм в длину, при этом в теле зерен частиц обнаружено не было. Результаты ЭДС анализа σ -фазы в С-ВЭС образцах представлены на рисунке 1 *в*.



Рис. 1. СМ-изображения поверхности образцов: (a) - И-ВЭС, (б) - С-ВЭС; (в) - ПЭМ-изображение С-ВЭС образца с ЭДС-анализом дисперсных частиц

В таблице 1 приведена зависимость механических характеристик: удлинения до разрушения δ , предела текучести $\sigma_{0,2}$, предела прочности σ_6 при комнатной температуре для исследуемых И-ВЭС и С-ВЭС образцов до и после наводороживания. Анализ экспериментальных данных показывает, что насыщение водородом вызывает увеличение $\sigma_{0,2}$ в обоих состояниях, что вызвано твердорастворным упрочнением сплава атомами водорода. Наводораживание вызывает заметное снижение предела прочности σ_6 в образцах И-ВЭС на 15 МПа, а в образцах С-ВЭС, наоборот, происходит увеличение σ_6 на 55 МПа. Коэффициент водородного охрупчивания К_н был вычислен по формуле (1):

$$\mathbf{K}_{\mathrm{H}} = \left[\left(\delta_0 - \delta_H \right) / \delta_0 \right] \times 100\%,\tag{1}$$

где δ_0 и δ_H – полное удлинение до разрушения ненаводороженных и наводороженных образцов. Он характеризует уменьшение удлинения до разрушения, вызванное водородом. В С-ВЭС сплаве величина $K_H^{C-BЭC}$ почти в два раза меньше, чем в И-ВЭС сплаве. Это указывает на положительное влияние выделения зеренограничных частиц σ -фазы при старении на устойчивость к водородному охрупчиванию.

На рисунке 2 приведены РЭМ-изображения поверхностей разрушения И-ВЭС и С-ВЭС образцов с предварительным насыщением водородом и без наводораживания. Образцы, которые испытывали без насыщения водородом, разрушались вязко транскристаллитно с образованием ямочного излома (рис. 2 *a*, *в*).

Таблица 1

Влияние насыщения во	рдородом на л	механические	свойства:	(а) - удлинение	до разрушения;	(б) - предел

Материал	δ, %, ±2 %	$σ_{0.2}$, ΜΠa, ±5 ΜΠa	$ σ_B $, ΜΠa, ±5 ΜΠa	K _H , %
И-ВЭС	62	160	490	22
И-ВЭС+Н	48	185	475	23
С-ВЭС	65	155	470	12
С-ВЭС+Н	57	215	525	12

текучести; (в) - предел прочности; (г) - коэффициент водородного охрупчивания

В образцах без частиц хрупкий наводороженный слой разрушается преимущественно интеркристаллитно, однако на поверхности разрушения также присутствуют транскристаллитные фасетки (рис. 2 б). Хрупкий наводороженный слой в С-ВЭС образцах разрушается исключительно интеркристаллитно (рис. 2 ϵ). Толщина хрупких слоев (D_H) составляет: 70 ± 21 мкм для И-ВЭС и 28 ± 7 мкм С-ВЭС образцов, что коррелирует с данными механических свойств, отношение $D_H^{H-BЭC}/D_H^{C-BЭC} \approx K_H^{H-BЭC}/K_H^{C-BЭC} \approx 2.$



Рис. 2 РЭМ-изображения поверхности разрушения И-ВЭС (а,б) и С-ВЭС (в, г) образцов после испытаний на одноосное растяжение: (а, в) - без предварительного наводороживания; (б, г) – с предварительным наводороживанием

Заключение. Таким образом, образцы сплава CoCrFeMnNi после старения при температуре 900°C в течение часа оказываются более устойчивы к эффектам водородного охрупчивания, по сравнению с исходными однофазными образцами. Это вызвано выделением частиц σ-фазы вдоль границ в состаренных образцах, что приводит к появлению большого количества мест для накопления водорода на межфазных и межзеренных границах, которые затрудняют диффузию водорода вглубь образца.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00261).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // Materials Science and Engineering A – 2004 – V. 375–377 – P. 213–218.
- Schuh B., Mendez-Martin F., Völker B., George E.P., Clemens H., Pippan R. A. Hohenwarter Mechanical properties, microstructure and thermal stability of a nanocrystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy after severe plastic deformation // Acta Mater. – 2015 – V. 96 – P. 258–268
- Klimova M.V., Shaysultanov D.G., Zherebtsov S.V., Stepanov N.D. Effect of second phase particles on mechanical properties and grain growth in a CoCrFeMnNi high entropy alloy // Materials Science and Engineering: A – 2019 – V. 748 – P. 228-235
- Wei F.G., Tsuzaki K. Quantitative Analysis on Hydrogen Trapping of TiC Particles in Steel // Metall and Mat Trans A. – 2006 – V. 37 – P. 331–353