

УДК 538.951

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТОК НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ
ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА КАНТОРА**

А.С. Нифонтов^{1,2}, М.Ю. Панченко², Е.А. Загibalова^{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

E-mail: asn42@tpu.ru

**THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON HYDROGEN EMBRITTLEMENT
OF A HIGH-ENTROPY CANTOR ALLOY**

A.S. Nifontov^{1,2}, M.Yu. Panchenko², E.A. Zagibalova^{1,2}

Scientific Supervisor: Ass. Prof., Dr. E.G. Astafurova

¹Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

²Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russia, Tomsk, Akademicheskoy pr. 2/4, 634055

E-mail: asn42@tpu.ru

Abstract. *The effect of microstructural parameters (density of grain boundaries and precipitates) on hydrogen embrittlement of equiatomic high-entropy alloy (CoCrFeMnNi) was investigated. Regardless of the phase composition and grain size of the specimens, hydrogen-charging leads to a decrease of their plasticity and brittle cracking of the surface layers during tensile testing. Both the decrease in grain size and the precipitation of σ -phase contribute the hydrogen embrittlement of the Cantor alloy: the hydrogen embrittlement index for such specimens decreases by 2 times ($K_H = 12\%$) relative to the initial coarse-grained single-phase specimens ($K_H = 26\%$).*

Введение. Эквиатомный сплав CoCrFeMnNi (сплав Кантора) – один из известных представителей высокоэнтروпийных сплавов (ВЭС) с ГЦК кристаллической решеткой. Он обладает следующими отличительными особенностями: сохранение высокой пластичности и вязкого характера разрушения как при комнатных, так и при криогенных температурах, стойкость к коррозии и радиационному повреждению [1]. В работе [2] было показано, что при одинаковых режимах насыщения сплав Кантора более устойчив к водородному охрупчиванию, чем стабильные аустенитные стали, которые принято считать наиболее стойкими к негативному влиянию водорода по сравнению со сталями других классов [2]. Поэтому необходимы комплексные исследования закономерностей водородного охрупчивания перспективного сплава Кантора в водородосодержащих средах. Целью данной работы является установление влияния микроструктуры на закономерности водородного охрупчивания высокоэнтропийного сплава Кантора.

Экспериментальная часть. В качестве материала для исследования был выбран многокомпонентный высокоэнтропийный сплав Кантора (ВЭС) с ГЦК кристаллической решёткой. Химический состав исследуемого сплава: 20Fe-20Mn-20Cr-20Ni-20Co (ат. %). Для формирования

гомогенного твердого раствора была проведена термомеханическая обработка литых заготовок, общая для всех исследуемых состояний. Она включала в себя отжиг при температуре 1200°C в течение 2 ч с последующей закалкой в воду и прокатку с осадкой 75%. После прокатки для получения различной микроструктуры были проведены следующие обработки: 1 – отжиг при 1200 °С в течение 2 ч с последующей закалкой в воду для формирования крупного аустенитного зерна (К-ВЭС), 2 – после отжига (1200 °С, 2 ч) для выделения вторичных фаз проводили старение при температуре 900°C в течение 1 ч (С-ВЭС), 3 – для формирования мелкокристаллической структуры прокатанные образцы отжигали при $T=950^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч с последующей закалкой в воду (М-ВЭС). Наводороживание образцов проведено электролитическим методом при плотности тока $j_H = 10 \text{ mA/cm}^2$ в течение 50 ч при комнатной температуре в 3 %-водном растворе NaCl (с добавлением 3 г/л NH_4SCN). Поверхности разрушения образцов были изучены методом растровой электронной микроскопии (РЭМ, микроскоп LEO EVO 50, Zeiss). Исследование микроструктуры проводили с помощью металлографического (оптического) микроскопа (ОМ, микроскоп Altami MET 1C) и просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ, микроскоп JEOL JEM 2110). Рентгеновские исследования выполняли на дифрактометре ДРОН 7 (Буревестник) с использованием $\text{Co K}\alpha$ излучения. Механические испытания на одноосное статическое растяжение проводили на механической установке LFM 125 (Walter+Bai AG, Швейцария) при начальной скорости деформации $5 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ при комнатной температуре.

Результаты. На рисунке 1 приведены ОМ-изображения поверхности К-ВЭС и М-ВЭС образцов и ПЭМ-изображение микроструктуры С-ВЭС образца. И-ВЭС и С-ВЭС образцы характеризуются одинаковым средним размером зерна – $215 \pm 77 \text{ мкм}$. Средний размер зерна для М-ВЭС образцов составляет $25 \pm 10 \text{ мкм}$ (рис. 1 б). Рентгеноструктурный анализ показал, что независимо от режима термической обработки на рентгенограммах К-ВЭС, С-ВЭС и М-ВЭС образцов наблюдаются пики только от аустенитной ГЦК фазы. Однако с помощью ПЭМ анализа в С-ВЭС образцах по границам зерен были выявлены частицы интерметаллидной σ -фазы пластинчатой формы (размер пластин $150 \pm 25 \text{ нм}$ в ширину и $740 \pm 170 \text{ нм}$ в длину) (рис.1 в). Результаты ЭДС анализа σ -фазы в С-ВЭС образцах свидетельствуют о том, что частицы обогащены по хрому (рис. 1 в). Для К-ВЭС и М-ВЭС образцов электронно-микроскопические исследования подтвердили формирование однофазной аустенитной ГЦК структуры.

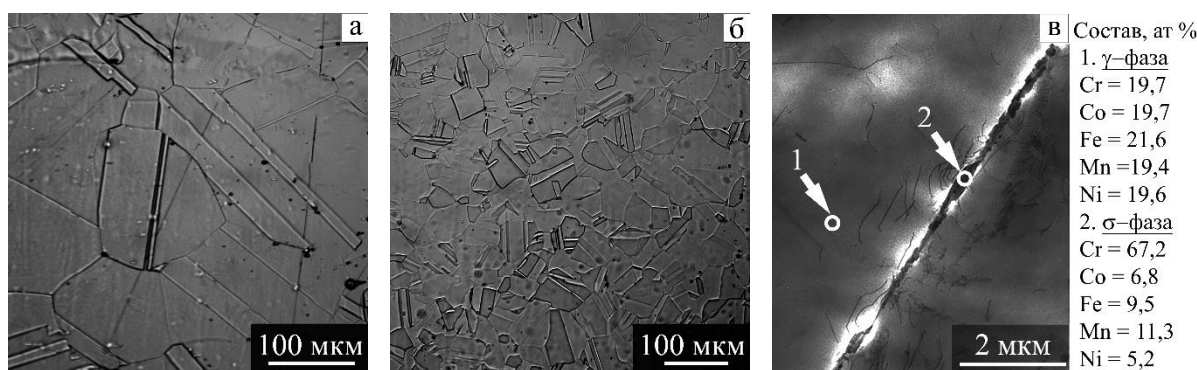


Рис. 1. ОМ-изображения поверхности образцов: (а) - И-ВЭС, (б) – М-ВЭС; (в) – изображение С-ВЭС образца, полученное в режиме сканирующей ПЭМ с результатами ЭДС-анализа

На рисунке 2 показаны диаграммы, демонстрирующие влияние насыщения водородом на механические свойства (удлинение до разрушения - δ , предел текучести - $\sigma_{0,2}$ и предел прочности - σ_B),

полученные после испытаний на одноосное статическое растяжение при комнатной температуре для исследуемых К-ВЭС, С-ВЭС и М-ВЭС образцов до и после наводороживания. Анализ экспериментальных данных показывает, что насыщение водородом вызывает увеличение $\sigma_{0,2}$ во всех состояниях, что вызвано твердорастворным упрочнением сплава атомами водорода.

Коэффициент водородного охрупчивания K_H , характеризующий вызванное водородом уменьшение удлинения до разрушения, был вычислен по формуле:

$$K_H = [(\delta_0 - \delta_H) / \delta_0] \times 100 \%, \quad (1)$$

где δ_0 и δ_H – полное удлинение до разрушения ненаводороженных и наводороженных образцов. В С-ВЭС и М-ВЭС образцах величина K_H почти в два раза меньше, чем в К-ВЭС сплаве. Снижение коэффициента водородного охрупчивания указывает на положительное влияние уменьшения размера зерна и выделения зернограницных частиц σ -фазы при старении на устойчивость к водородному охрупчиванию.

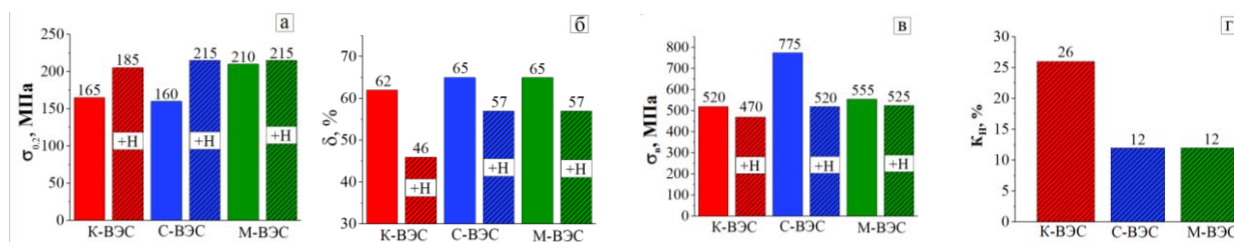


Рис. 2. Влияние наводороживания на механические свойства К-ВЭС, С-ВЭС и М-ВЭС образцов: (а) - удлинение до разрушения; (б) - предел текучести; (в) - предел прочности; (г) - коэффициент водородного охрупчивания (K_H); «+H» указывает на предварительное насыщение образцов водородом

До наводороживания образцы во всех состояниях разрушаются вязко транскристаллитно. Насыщение водородом образцов К-ВЭС, С-ВЭС и М-ВЭС вызывает появление поверхностного хрупкого слоя, который разрушается интеркристаллитно хрупко. Измельчение зёрненной структуры и выделение частиц σ -фазы в сплаве не приводит к изменению макро- и микромеханизмов разрушения наводороженного слоя, но способствует уменьшению его толщины (D_H): для И-ВЭС образцов $D_H = 69,7 \pm 20,7$ мкм, для М-ВЭС образцов $D_H = 21,5 \pm 5$ мкм, а для С-ВЭС образцов $D_H = 28,0 \pm 7,0$ мкм. Это согласуется с данными, полученными при анализе механических свойств.

Заключение. Независимо от фазового состава и размера зерна исследуемых образцов, насыщение водородом приводит к уменьшению их пластичности. Уменьшение размера зерна и выделение зернограницной σ -фазы приводит к повышению устойчивости к водородному охрупчиванию многокомпонентного сплава Кантора.

Исследования проведены с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» (ИФПМ СО РАН, Томск). Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00261).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. Cantor, I.T.H. Chang, P. Knight, A.J.B. Vincent Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // Materials Science and Engineering A – 2004 – V. 375–377 – P. 213–218.
2. Li, X. [et al]. Hydrogen embrittlement and failure mechanisms of multiprincipal element alloys: A review // J. Mater. Sci. Technol. – 2022. – № 122. – P. 20-32.