

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный исследовательский
Томский государственный университет»

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

XVIII Российской научной студенческой конференции
«Физика твёрдого тела»
(ФТТ-2022)

28 – 31 марта 2022 года
Томск, Россия

Томск – 2022

**ОСОБЕННОСТИ ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ
СИСТЕМЫ FeMnCrNiCo(N)**

Д.Ю. Гуртова¹, Д.О. Астапов¹, М.Ю. Панченко²

Научный руководитель: доцент, д.ф.-м.н., Е.Г. Астафурова

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

E-mail: dasha_gurtova@mail.ru

Термин «высокоэнтропийные сплавы» (ВЭС) относят к сплавам, состоящим из большого количества компонентов (часто не менее пяти), причем количество каждого из них не должно превышать 35 ат. % и не должно быть меньше 5 ат. % [1]. Данный класс материалов привлек значительное внимание исследователей в последнее десятилетие, поскольку высокоэнтропийные сплавы, в особенности, сплавы с гранцентрированной кубической решеткой на базе системы CoCrFeNiMn (сплав Кантора), демонстрируют исключительные механические свойства, в частности сочетание высокой прочности и пластичности при криогенных температурах [2]. Тем не менее изучение данного класса материалов не должно ограничиваться получением только простых структур твердого раствора замещения, а может получить развитие в области разработки сплавов с более высокими эксплуатационными характеристиками на основе комплексных твердых растворов замещения и внедрения. Введение атомов внедрения, например, азота, является одним из эффективных методов улучшения механических свойств ВЭС. Поэтому исследование вопроса по влиянию атомов азота на высокоэнтропийные сплавы остается актуальным. Несмотря на повышенный интерес к ВЭС, их восприимчивость к разрушительному действию водорода, открытому в 1870-х годах (водородному охрупчиванию [3]), подробно не изучалась. Будущие элементы конструкций, изготовленные из высокоэнтропийных сплавов, несомненно будут подвергаться воздействию водорода в потенциальных рабочих средах, например, в среде водяных реакторов атомных электростанций с высоким содержанием водорода [4]. Принимая данный факт во внимание, становится ясно, что важно изучать влияние водорода на механическое поведение сплавов этого класса. Целью данной работы является установить влияние азота на закономерности водородного охрупчивания высокоэнтропийного сплава FeMnCrNiCo(N).

Объектом исследования были выбраны два высокоэнтропийных сплава с ГЦК решеткой: сплав без азота 20,0Fe-20,0Mn-20,0Cr-20,0Ni-20,0Co (ВЭС) и легированный азотом 20,0Fe-20,0Mn-20,0Cr-20,0Ni-18,6Co-1,4N (ВЭС-1,4N) (ат. %). Для формирования однофазного твердого раствора образцы исследуемых сплавов были подвержены термомеханической обработке (ТМО). Электролитическое наводороживание проводилось в 3 % водном растворе NaCl, содержащем 3 г/л NH₄SCN, при плотности тока 10 мА/см² в течение 50 ч. Одноосное растяжение с начальной скоростью 5×10⁻⁴ с⁻¹ проводили при комнатной температуре на установке LFM 125 (Walter+Bai AG). Методами рентгеноструктурного анализа, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии было установлено, что образцы обоих сплавов после ТМО имеют однофазную крупнокристаллическую аустенитную структуру со средним размером зерна около 200 мкм. Анализ результатов испытаний на одноосное растяжение при комнатной температуре показывает, что предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел прочности σ_b и пластичность образцов δ увеличиваются при легировании сплавов атомами азота (табл. 1).

XVIII РОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ СТУДЕНЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА. 28 – 31 марта 2022, ТОМСК

После насыщения водородом наблюдается небольшое повышение предела текучести обоих исследуемых сплавов, что является следствием твердорастворного упрочнения атомами водорода. Коэффициент водородной хрупкости I_H , который характеризует вызванное водородом уменьшение удлинения до разрушения, для образцов с азотом практически в два раза меньше, чем для образцов без азота (табл.1).

Таблица 1. Механические свойства при растяжении до и после наводороживания.

| | δ , % | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_B , МПа | I_H , % |
|------------|--------------|----------------------|------------------|-----------|
| ВЭС | 64 | 184 | 521 | 25 |
| ВЭС+Н | 48 | 189 | 473 | |
| ВЭС-1,4N | 71 | 290 | 702 | 14 |
| ВЭС-1,4N+Н | 61 | 311 | 693 | |

С помощью электронно-микроскопического исследования деформированных образцов до и после наводороживания были выявлены единые закономерности влияния водорода на дислокационную структуру изучаемых сплавов – усиление планарности скольжения, что может быть спровоцировано уменьшением энергии дефекта упаковки после насыщения водородом. Во всех образцах после наводороживания появляется хрупкий поверхностный слой, толщина которого в образцах ВЭС намного шире $W_H = 70 \pm 21$ мкм, чем в образцах ВЭС-1,4N $W_H = 45 \pm 14$ мкм. Хрупкий наводороженный слой разрушается в основном интеркристаллитно, но наблюдаются и транскристаллитные фасетки, доля которых увеличивается при легировании ВЭС азотом (рис. 1).

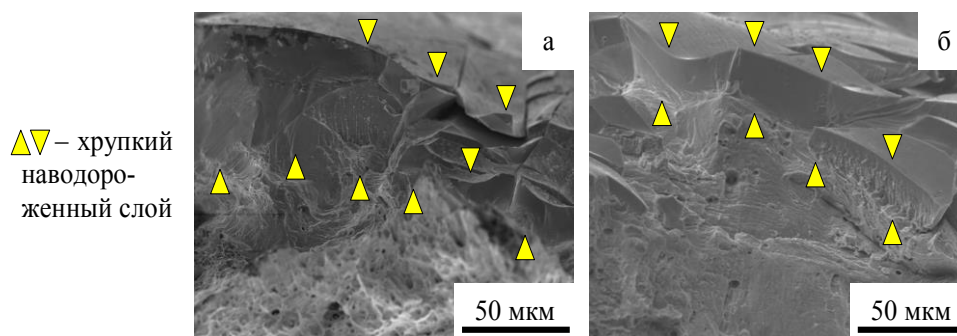


Рис. 1 – Изображения поверхности разрушения образцов после насыщения водородом, полученные методом сканирующей электронной микроскопии: а – ВЭС, б – ВЭС-1,4N

Таким образом, легирование азотом способствует уменьшению толщины хрупкого наводороженного слоя и повышению устойчивости образцов высокоэнтропийных сплавов к водородному охрупчиванию.

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

Литература

1. Ремпель А.А., Гельчинский Б.Р. Высокоэнтропийные сплавы: получение, свойства, практическое применение // Изв. Вуз. Черная Металлургия. – 2020. – № 63 (3-4). – С. 248-253.
2. Cantor B. Multicomponent high-entropy Cantor alloys // Prog. Mater Sci.. – 2021. – № 120.
3. Lynch S. Hydrogen embrittlement phenomena and mechanisms // Corros. Rev. – 2012. – № 3-4. – P. 105-123.
4. Zhao Y., et. al. Resistance of CoCrFeMnNi high-entropy alloy to gaseous hydrogen embrittlement // Scripta Materialia. – 2017. – № 135. – P. 54-58.