

5. Zhang D., Qiu D., Gibson M. A., Zheng Y., Fraser H. L., StJohn D. H., Easton M. A. Additive manufacturing of ultrafine-grained high-strength titanium alloys // Nature. – 2019. – Vol. 576. – No. 7785. – P. 91–95.
6. Zykova A., Vorontsov A., Nikolaeva A., et al. Structural design and performance evaluation of Ti6Al4V/5% Cu produced by electron-beam additive technology with simultaneous double-wire feeding // Materials Letters. – 2022. – Vol. 312. – P. 131586.
7. Зыкова А.П., Воронцов А.В., Чумаевский А.В. и др. Влияние многопроходной фрикционной перемешивающей обработки на формирование микроструктуры и механические свойства сплава ВТ6 // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2022. – Т. 28. – №. 1. – С. 39–51

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРНА 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

E-mail: asn42@tpu.ru

Водородному охрупчиванию подвержены многие элементы приборов и конструкций, используемых в нефтегазовой, атомной и других отраслях промышленности. Водородная хрупкость – это эффект уменьшения прочностных и пластических свойств металла вследствие воздействия водорода. В настоящее время активно ведутся исследования водородного охрупчивания (ВО) высокоэнтропийного сплава CoCrFeMnNi (сплав Кантора, ВЭС) так как было экспериментально показано, что высокоэнтропийные сплавы с ГЦК структурой менее подвержены негативному воздействию водорода, чем стабильные аустенитные стали, которые считаются наиболее устойчивыми к ВО среди сталей различных классов [1]. В работе [2] было установлено, что насыщение водородом приводит даже к повышению прочностных свойств и удлинения до разрушения сплава Кантора при газовом наводороживании при давлении 15 МПа и температуре 300°C в течение 72 часов. При этом в литературе есть ряд работ, где сплав Кантора после насыщения водородом демонстрирует заметное уменьшение пластичности, а разрушение наводороженных образцов происходит преимущественно хрупко [3,4]. Таким образом, существует потребность в дальнейшем изучении закономерностей водородного охрупчивания ВЭС Кантора, чтобы разработать методы борьбы с пагубным воздействием водорода. Известно, что одним из используемых методов повышения устойчивости к индуцированному водородом интеркристаллитному разрушению является измельчение зёрненной структуры, так как уменьшение размера зерен понижает удельную концентрацию водорода на границах зерен, подавляя хрупкое разрушение, вызванное водородом [5,6]. Поэтому цель данной работы – установление влияния размера зерна на закономерности водородного охрупчивания сплава Кантора.

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

проведена термомеханическая обработка, включающая отжиг при температуре 1200°C в течение 2 часов с последующей закалкой в воду и прокатку с осадкой 75%. После, для получения крупного размера зерна, часть полученных образцов подвергали отжигу при 1200°C в течение 2 часов с последующей закалкой в воду (крупнокристаллические образцы, К-ВЭС). Мелкозернистые образцы получили путем отжига при 950°C в течение 1 часа с последующей закалкой в воду (мелкокристаллические образцы, М-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. Исследование микроструктуры проводили с помощью светового микроскопа (СМ) Altami MET 1С. Механические испытания на одноосное статическое растяжение проводили с использованием плоских пропорциональных образцов в форме двойных лопаток с размерами рабочей части 12,0×2,7×1,2 (мм) на механической установке LFM 125 (Walter+Bai AG, Швейцария) при начальной скорости деформации 5×10^{-4} с⁻¹, температура испытания – комнатная. Поверхности разрушения образцов были изучены методом растровой электронной микроскопии с помощью микроскопа Thermo Fisher Scientific Apreo S Lovac.

На рисунке 1 приведены СМ-изображения поверхности образцов К-ВЭС и М-ВЭС. Образцы К-ВЭС обладали крупнокристаллической структурой со средним размером зерна 215 ± 77 мкм, в образцах М-ВЭС средний размер зерна был значительно меньше и составлял 25 ± 10 мкм. В обоих состояниях присутствует большое количество двойников отжига. Данные рентгеноструктурного анализа подтвердили формирование однофазной аустенитной структуры в К-ВЭС и М-ВЭС образцах.

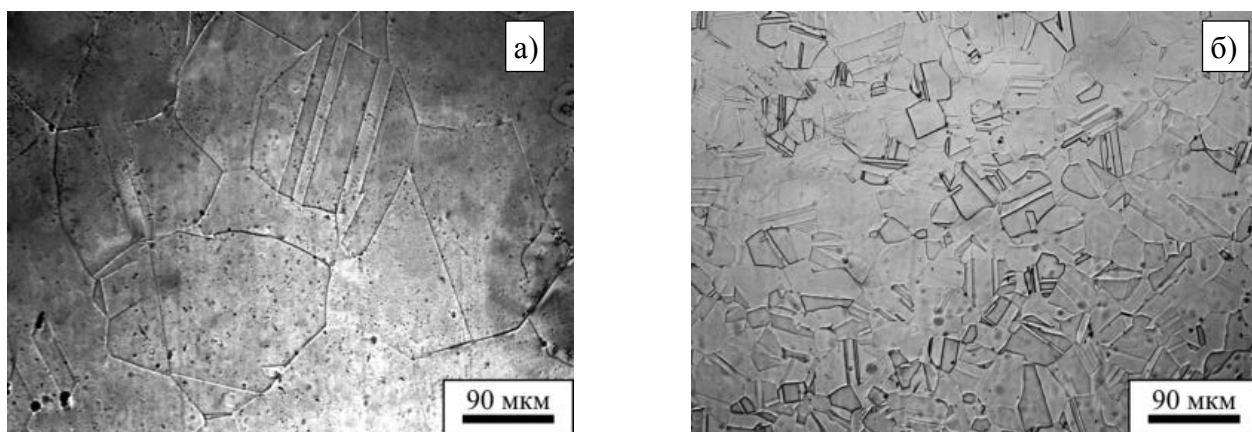


Рисунок 1 – СМ изображения поверхности образцов: а) К-ВЭС, б) М-ВЭС

В таблице 1 представлены механические свойства исследуемых образцов после испытаний на одноосное статическое растяжение: удлинение до разрушения - δ , предел текучести - σ_y и предел прочности - σ_b . С уменьшением размера зерна в исходных образцах до наводороживания повышаются предел прочности и предел текучести. Повышение предела текучести объясняется известным эмпирическим законом Холла-Петча [7,8]:

$$\sigma_y = \sigma_0 + K_y d^{-1/2}, \quad (1)$$

где σ_y - зависимость предела текучести от размера зерна, d - размер зерна, K_y - коэффициент Холла-Петча (для сплава Кантора равен ~ 500 МПа*мкм^{1/2} [9]), σ_0 - предел текучести.

Таблица 1 – Механические свойства, полученные после испытаний на одноосное растяжение

Образец	δ , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа
К-ВЭС	62	185	520
К-ВЭС+Н	46	205	470
М-ВЭС	65	210	555
М-ВЭС+Н	57	215	535

Н – предварительное насыщение водородом

После наводороживания в обоих типах образцов наблюдается снижение предела прочности и удлинения до разрушения. В обоих состояниях после наводороживания незначительно повышается предел текучести: $\Delta\sigma_{0,2}^{M-ВЭС+Н} = 5$ МПа, $\Delta\sigma_{0,2}^{K-ВЭС+Н} = 20$ МПа, что связано с твердорастворным упрочнением аустенитной фазы атомами водорода. При этом разница в величине твердорастворного упрочнения может косвенно указывать на разное распределение водорода в крупнокристаллических и мелкокристаллических образцах в процессе насыщения. Для обоих состояний был рассчитан коэффициент водородного охрупчивания, который характеризует потерю пластичности, вызванную водородом (2):

$$K_H = \left[\frac{\delta_0 - \delta_H}{\delta_0} \right] \times 100\%, \quad (2)$$

где δ_0 и δ_H – полное удлинение до разрушения ненаводороженных и наводороженных образцов. Для К-ВЭС K_H равен 26%, а для М-ВЭС равен 12%. Следовательно, образцы с меньшим размером зерна более устойчивы к ВО.

До насыщения водородом образцы в обоих состояниях разрушались вязко транскристаллитно с формированием ямочного излома на поверхностях разрушения. Насыщение водородом приводит к появлению хрупкого слоя на поверхности образцов. В обоих состояниях наводороженный слой разрушается хрупко, преимущественно интеркристаллитно, однако на поверхности разрушения также присутствуют транскристаллитные фасетки. Уменьшение размера зерна не влияет на механизм разрушения хрупкого наводороженного слоя, но изменяет его толщину: В крупнокристаллических образцах хрупкий наводороженный слой имел толщину $D_H^{K-ВЭС} = 69,7 \pm 20,7$ мкм, а в мелкокристаллических образцах толщина слоя была значительно меньше и равна $D_H^{M-ВЭС} = 21,5 \pm 5$ мкм, что согласуется с данными, полученными при исследовании механических свойств.

Таким образом, образцы сплава Кантора с меньшим размером зерна (25 ± 10 мкм) более устойчивы к негативному воздействию водорода по сравнению с крупнокристаллическими образцами (215 ± 77 мкм). Уменьшение размера зерна способствует уменьшению толщины хрупкого наводороженного слоя и коэффициента водородного охрупчивания: от $D_H = 69,7 \pm 20,7$ мкм и $K_H = 25,8\%$ для крупнокристаллических образцов до $D_H = 21,5 \pm 5$ мкм и $K_H = 12,3\%$ для мелкокристаллических образцов.

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

Список литературы

1. Zhao Y., Lee D.-H, Seok M.-Y., et.al, Resistance of CoCrFeMnNi high-entropy alloy to gaseous hydrogen embrittlement // Scripta Mater. - 2017. – V. 135. – P. 54-58.
2. Zhao Y., Lee D.-H, Kim W.-J., et.al, Influence of pre-strain on the gaseous hydrogen embrittlement resistance of a high-entropy alloy // Mater. Sci. Eng. A. – 2018. - V. 718. – P. 43-47.

3. Astafurova E.G., Panchenko M.Yu., Reunova K.A., et.al, The effect of nitrogen alloying on hydrogen-assisted plastic deformation and fracture in FeMnNiCoCr high-entropy alloys // Scripta Mater. – 2021. – V.194. - 113642
4. Nygren K.E., Bertsch K.M., Wang S., et.al, Hydrogen embrittlement in compositionally complex FeNiCoCrMn FCC solid solution alloy // Curr. Opin. Solid State Mater. Sci. - 2018. – V. 22. – P. 1-7.
5. Koyama M., Ichii K., Tsuzaki K., Grain refinement effect on hydrogen embrittlement resistance of an equiatomic CoCrFeMnNi high-entropy alloy // Int. J. Hydrog. Energy. - 2019. - V. 44. – P. 17163-17167.
6. Fu Z.H., Yang B.J., Chen M., Gou G.Q., Chen H., Effect of recrystallization annealing treatment on the hydrogen embrittlement behavior of equimolar CoCrFeMnNi high entropy alloy // Int. J. Hydrog. Energy. - 2021. – V. 46. – P. 6970-6978.
7. Petch N.J., The cleavage strength of polycrystals // J. Iron. Steel. Inst. – 1953. – V. 174. – P. 25–28.
8. Hall E.O., The deformation and ageing of mild steel: III Discussion of results // Proc. Phys. Soc. B. – 1951. – V. 64. – P.747–753.
9. Otto F. et al. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy // Acta Mater. - 2013. - V. 61. - P. 5743–5755.

ПОДБОР ТЕРМООБРАБОТКИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕБУЕМЫХ СВОЙСТВ ОТЛИВОК СТАЛИ 20ГМЛ

В.А. ОВЧАРЕНКО, И.Л. СТРЕЛКОВА

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: vygornova@gmail.com

Импортозамещение ставит перед нами актуальные задачи для обеспечения нефтегазовой промышленности необходимыми изделиями. Так в нефтегазовой отрасли нашли широкое применение детали газопроводных труб изготовленные методом литья из стали 20ГМЛ. Свойства металла позволяют использовать его в средах, содержащих сероводород (H₂S) при температурах от -40 до +80 °С. Однако, учитывая крупногабаритность отливок, встает задача обеспечения однородности микроструктуры и механических свойств отливки во всех направлениях, что является необходимым условием для обеспечения безопасной работы деталей. Достичь это остается возможно посредством проведения термической обработки, для назначения которой необходимо проведение испытаний.

Выплавка исследуемого сплава была произведена в среднечастотной индукционной печи Inductoterm 3,5 т. Химический состав стали определялся оптико-эмиссионным спектрометром PMI-MASTER Sort, приведен в таблица 1.

Таблица 1 – Химический состав образцов

Маркировка	Массовая доля элементов, %										
	C	SI	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Co	V	Fe
20ГМЛ	0,12	0,19	1,04	0,30	0,31	0,50	<0,01	0,17	0,03	<0,01	остальное
ОСТ 26-07-402-83	0,12-0,20	0,20-0,40	0,20-0,40	0,50	0,25-0,35	0,50	-	-	-	-	остальное

Цель исследования заключалась в разработке режима термической обработки отливок, позволяющего получить для изделия, работающего в условиях повышенных давлений, высокую прочность и ударную вязкость.