

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ ВЫСОКОАЗОТИСТОЙ
АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ, ПОДВЕРГНУТОЙ ДИСПЕРСИОННОМУ ТВЕРДЕНИЮ**

М.Ю. Панченко¹, А.С. Михно², Е.А. Загибалова²

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

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: panchenko.marina4@gmail.com

**HYDROGEN EMBRITTLEMENT OF HIGH-NITROGEN AUSTENITIC STEEL AFTER DIFFERENT
REGIMES OF AGE-HARDENING**

M.Yu. Panchenko¹, A.S. Mihno², E.A. Zagibalova²

Scientific Supervisor: assistant professor, Doctor of Sciences (Phys & Math) E.G. Astafurova

¹Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russia, Tomsk, Akademichesky pr. 2/4, 634055

²National Research Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: panchenko.marina4@gmail.com

***Abstract.** Hydrogen embrittlement peculiarities of high-nitrogen austenitic Fe-19Cr-22Mn-1,5V-0,3C-0,9N steel after age-hardening at temperature of 700°C for 0.5 and 10 h were investigated. After aging, grain boundaries and interphase boundaries act as effective trap sites for hydrogen atoms. The discontinuous decomposition of austenite with the formation of Cr₂N particles predominantly along the grain boundaries after age-hardening increases susceptibility to hydrogen embrittlement.*

Введение. Одной из актуальных проблем развития водородной энергетики является создание новых конструкционных материалов, устойчивых к водородному охрупчиванию. Как показано в [1], среди сталей наибольшей устойчивостью к водородному охрупчиванию обладают стабильные аустенитные стали. Высокоазотистые аустенитные стали (ВАС) сохраняют хорошие коррозионные и пластические свойства, при этом они избавлены от основного недостатка аустенитных сталей – низкого предела текучести. Известно, что при термических обработках в интервале температур 500 – 1000°C ВАС претерпевают структурно-фазовые превращения с образованием нитридов Cr₂N, карбидов Cr₂₃C₆ и интерметаллидной σ-фазы [2]. В работах [3,4] установлено, что в сталях частицы вторичных фаз могут выступать в качестве «ловушек» для атомов водорода и замедлять его диффузию. Таким образом, представляет интерес изучение влияния дисперсных частиц на основе хрома и ванадия на механизмы водородного охрупчивания в высокоазотистой аустенитной стали.

Материалы и методы. Объектом исследования была выбрана высокоазотистая аустенитная сталь, легированная ванадием: Fe-19Cr-22Mn-1.5V-0.15Ni-0.3C-0.86N (мас. %) (ВАС). После горячей прокатки при температуре 1150°C вырезали образцы в форме двойных лопаток с размерами рабочей части: 12 × 1,3 × 2,5мм. Образцы были закалены в воду после выдержки при температуре 1200°C, 30 мин, затем проводилось старение в среде инертного газа при температуре 700°C с продолжительностью 0,5 и 10 ч с последующей закалкой в воду. Электролитическое наводороживание образцов проводили при

комнатной температуре в 3 % водном растворе NaCl, содержащем 3 г/л NH_4SCN , в течение 100 ч при плотности тока 100 А/м^2 (Н). Поверхности разрушения образцов была изучены методом растровой электронной микроскопии (микроскоп VEGA3 TESCAN). Для исследования микроструктуры образцов использовался просвечивающий электронный микроскоп Technai G2 FEI.

Результаты. В исходном состоянии (после закалки от температуры 1200°C , 0,5 ч) структура ВАС представляет собой аустенит, содержащий частицы на основе ванадия $(\text{V,Cr})(\text{N,C})$ с размером 300-400 нм (рис. 1 а). Электронно-микроскопическое исследование показали, что при старении 700°C , 0,5 ч по границам зерен начинается реакция прерывистого распада аустенита с образованием ячеек нитрида хрома Cr_2N и обедненного по азоту аустенита (рис. 1 б). После старения по режиму 700°C , 10 ч прерывистый распад происходит не только по границам зерен, но и охватывает некоторые зерна целиком. Помимо прерывистого выделения нитридов Cr_2N в зернах аустенита при старении 700°C , 10 ч происходит гомогенное зарождение и рост дисперсных нитридов ванадия (рис 1 в).

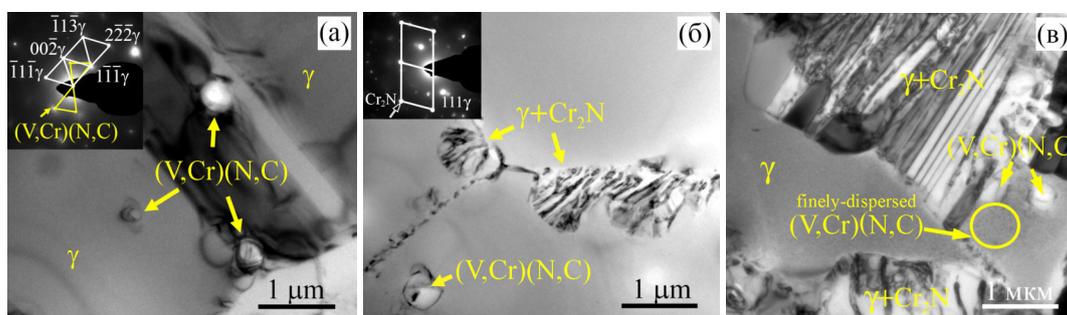


Рис. 1. Электронно-микроскопическое светлопольное изображение структуры стали после закалки от 1200°C , 0,5 ч (а) и после старении 700°C , 0,5 ч (б) и 10 ч (в)

В таблице 1 представлены данные о механических свойствах ВАС до и после наводороживания. Наводороживание не влияет на предел текучести и пластичность закаленных образцов. В состаренных образцах после наводороживания предел текучести не изменяется, но значительно уменьшается пластичность, причем увеличение продолжительности старения приводит к увеличению коэффициента водородного охрупчивания. На рисунке 2 показаны изображения поверхности разрушения наводороженных образцов, полученные методом растровой электронной микроскопии. При наводороживании закаленных образцов формируется хрупкий поверхностный слой 10-15 мкм, который разрушается преимущественно интеркристаллитно хрупко, и вязкая матрица (не насыщенная водородом).

Таблица 1

Влияние наводороживания на механические свойства стали Fe-19Cr-22Mn-1,5V-0,3C-0,9N

Обработка	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	удлинение, %	ϵ , однородная деформация	I_H , %	
Закалка 1200°C , 0,5 ч	без старения	740	1800	55.1	0.35	—
	Без старения + Н	770	1770	56.0	0.37	
	700°C , 0,5 ч	820	1840	50.1	0.33	
	700°C , 0,5 ч +Н	820	1660	32.3	0.24	36
	700°C , 10 ч	970	1550	14.5	0.12	
	700°C , 10 ч +Н	990	1390	6.3	0.05	

В поверхностных слоях образцов также наблюдали элементы транскристаллитного излома (квазисколов) и ямки от выкрошенных частиц $(V,Cr)(N,C)$ на поверхностях разрушения, что свидетельствует о накоплении водорода преимущественно по границам зерен и на межфазных границах (частицы/аустенит). При наводороживании состаренных $700^{\circ}C$, 0,5 ч образцов на поверхности излома в поверхностном слое толщиной 5-10 мкм разрушение реализовывалось исключительно по границам зерен (рис. 2 б), а на больших расстояниях от боковой поверхности наблюдали вторичные интеркристаллитные трещины и области вязкого транскристаллитного излома (аналогично разрушению образцов без наводороживания). Толщина хрупкого наводороженного слоя, который разрушается по механизму квазискола, составляет 5 мкм в образцах при старении $700^{\circ}C$, 10 ч (рис. 2 в). Это свидетельствует о том, что ячейки прерывистого распада (частицы $Cr_2(N,C)$, аустенит) на границах аустенитных зерен и межфазные границы внутри претерпевших распад зерен выступают эффективными «ловушками» для атомов водорода и препятствуют его объемной диффузии вглубь образца. Выделение наноразмерных частиц ванадия в аустенитных зернах и рост ячеек распада с образованием пластин $Cr_2(N,C)$ в аустените изменяют микромеханизм разрушения наводороженного слоя от интеркристаллитного к транскристаллитному по механизму квазискола.

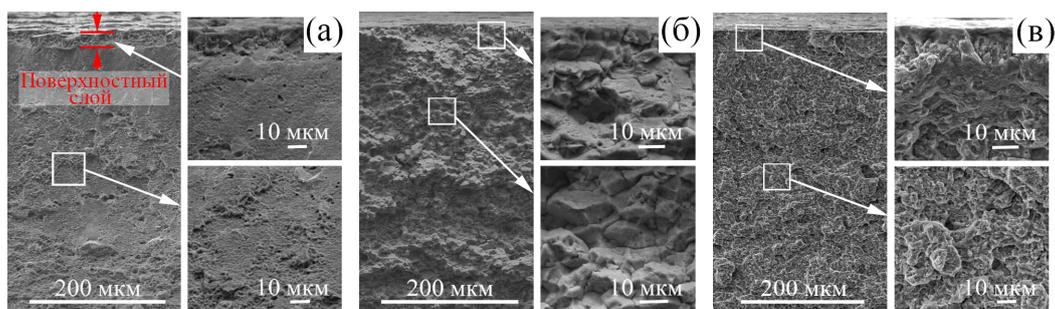


Рис. 2. Изображения поверхностей разрушения (сканирующая электронная микроскопия) после наводороживания исходного образца (а), после старения при $700^{\circ}C$, 0,5 ч(б) и $700^{\circ}C$, 10 ч(в)

Заключение. Наводороживание не вызывает сильных эффектов твердорастворного упрочнения и не приводит к потере пластичности закаленной ($1200^{\circ}C$, 0,5 ч.) ВАС. Старение при температуре $700^{\circ}C$, которое способствовало ячеистому распаду аустенита преимущественно по границам зерен с образованием нитридов хрома в аустените, способствует водородному охрупчиванию ВАС.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-19-01197).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lynch S. Hydrogen embrittlement phenomena and mechanisms // Corrosion reviews. – 2003 – Vol.30. – pp.105–123.
2. Gavriljuk V.G., Berns H. High nitrogen steel. – Springer, Berlin, 1999. – 386 p.
3. Takahashi J. , Kawakami K., Kobayashi Y. Origin of hydrogen trapping site in vanadium carbide precipitation. // Acta Mater. – 2018. – Vol.153. – pp.193–204.
4. Wei F.G., Tsuzaki K. Quantitative Analysis on Hydrogen Trapping of TiC Particles in Steel // Metall and Mat Trans A. – 2006. – Vol.37. – pp.331–353.