

**ВЛИЯНИЕ НАВОДОРОЖИВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОАЗОТИСТОЙ
АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ, ПОДВЕРГНУТОЙ ДИСПЕРСИОННОМУ ТВЕРДЕНИЮ**

А.С. Михно¹, М.Ю. Панченко², И. А. Тумбусова¹

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: nastia.mihno@yandex.ru

**THE EFFECT OF HYDROGEN-CHARGING ON MECHANICAL PROPERTIES OF A HIGH
NITROGEN AUSTENITIC STEEL SUBJECTED TO AGE-HARDENING**

A.S. Mihno¹, M.Yu. Panchenko², I.A. Tumbusova¹

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

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

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

E-mail: nastia.mihno@yandex.ru

Abstract. *In the present study, we investigate the effect of an electrolytical hydrogen-charging on mechanical properties of a high-nitrogen austenitic Fe-19Cr-22Mn-1.5V-0.3C-0.9N steel which has been treated via different age-hardening regimes. The initial solid-solution treated specimens do not undergo a hydrogen embrittlement. But hydrogen-charging provides a significant loss in a ductility of steel specimens which have been treated via age-hardening regimes (800°C for 0.5 h and 10 h).*

Введение. В настоящее время одной из актуальных задач водородной энергетики является улучшение характеристик материалов, способных безотказно работать в водородсодержащих средах. Как правило, насыщение водородом негативно отражается на свойствах металлов, а именно – вызывает их охрупчивание. Известно, что стабильные аустенитные стали наиболее устойчивы к деградации свойств в водородной среде в сравнении со сталями других классов [1]. Высокоазотистая аустенитная сталь обладает более высоким пределом текучести, прочностью и коррозионной стойкостью по сравнению с обычными аустенитными нержавеющими сталями. При термообработке в интервале температур 500°C - 1000°C данные стали склонны к выделению нитридов различного состава и интерметаллидных фаз (σ -фаза) [2], что может значительно влиять на механические свойства. В процессе водородного охрупчивания важную роль играют различные типы “ловушек”, которые являются местами захвата атомов водорода и могут замедлять его диффузию вглубь материала, приводить к подавлению или, напротив, инициированию эффектов водородной хрупкости. Известно, что вторичные фазы в сталях могут выступать в качестве эффективных ловушек для атомов водорода [3]. Поэтому исследование вопроса по выявлению роли выделяемых при термообработке вторичных фаз на водородное охрупчивание сталей сохраняют актуальность.

Целью данной работы является исследование влияния наводороживания на механические свойства высокоазотистой аустенитной стали, подвергнутой дисперсионному твердению.

Экспериментальная часть. Объектом исследования была выбрана высокоазотистая аустенитная сталь: Fe-19Cr-22Mn-1,5V-0,3C-0,9N (мас. %) (ВАС). После горячей прокатки при температуре 1150°C были вырезаны образцы в форме двойных лопаток с размерами рабочей части: 12 × 1,3 × 2,5 мм. Образцы были закалены в воду после выдержки при температуре 1200°C, 0,5 ч (исходный), затем проводили их старение при температуре 800°C и продолжительности 0,5 и 10 ч. Электролитическое наводороживание (Н) закаленных и состаренных образцов проводили при комнатной температуре в 3 % водном растворе NaCl, содержащем 3 г/л NH₄SCN, в течение 100 ч при плотности тока 100 А/см². Одноосное растяжение проводили при комнатной температуре с начальной скоростью 5 × 10⁻⁴ с⁻¹ на установке LFM 125 (Walter+Bai AG). Для исследования микроструктуры образцов использовался просвечивающий электронный микроскоп Technai G2 FEI.

Результаты. После закалки ВАС представляет собой аустенит с крупными частицами нитрида ванадия. На рентгенограмме (рис. 1а), соответствующей закаленному состоянию, наблюдаются линии аустенита γ_{N1} ($a=3,63 \text{ \AA}$) и нитрида ванадия VN (ГЦК, $a=4,08-4,11 \text{ \AA}$). На рис. 1б представлены данные энергодисперсионного анализа аустенитной матрицы и частицы VN. Частицы на основе ванадия также обогащены по хрому и углероду (V,Cr)(C,N). Анализ рентгенограмм показывает, что при старении наблюдается смещение линий аустенита в сторону больших углов дифракции, что свидетельствует об уменьшении параметра решетки аустенита и обеднении твердого раствора. При старении 800°C, 0,5 ч появляются пики обедненного по азоту аустенита (γ_{N2}) и рефлексы, соответствующие нитриду хрома Cr₂(N,C). После увеличения продолжительности старения до 10 ч, помимо выделения нитридов Cr₂(N,C), наблюдали рефлексы, соответствующие интерметаллидной σ -фазе. Электронно-микроскопические исследования подтвердили данные рентгеновского анализа: в состаренных образцах наблюдали ячейки прерывистого распада преимущественно по границам зерен с образованием Cr₂(N,C) и обедненного по азоту аустенита (γ_{N2}), наноразмерные частицы (V,Cr)(C,N) в теле зерен, образованные по непрерывному механизму распада (рис 1в), и зерна σ -фазы по границам аустенитных зерен.

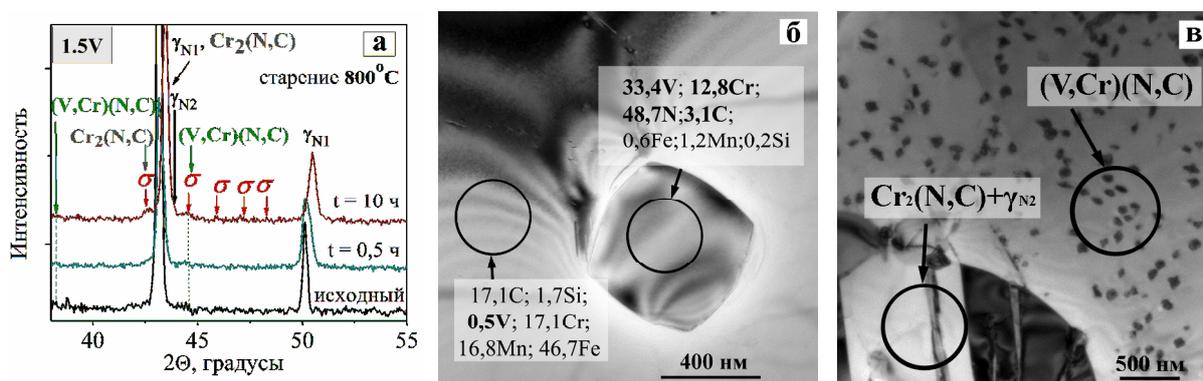


Рис. 1. Влияние продолжительности старения при температуре 800°C на вид рентгенограмм (а) и микроструктуру стали Fe-19Cr-22Mn-1,5V-0,3C-0,9N (б, в): б – закалка от 1200°C, 0,5 ч, в – старение при 800°C, 10 ч (в)

На рисунке 2 представлены данные о механических свойствах ВАС до и после наводороживания. До насыщения водородом образцы в закаленном состоянии (1200°C, 0,5 ч) обладали значительным

запасом пластичности (рис 2а). После старения наблюдается рост предела текучести, уменьшение пластичности и предела прочности стали, что обусловлено процессом зарождения и роста вторичных фаз ($Cr_2(N,C)$, σ -фаза). Наводороживание слабо влияет на механические свойства закаленных образцов. В состаренных образцах после наводороживания предел текучести не изменяется, но наблюдается снижение удлинения образцов до разрушения. Коэффициент водородного охрупчивания (I_H), который описывает потерю пластичности из-за водородно-индуцируемого охрупчивания образцов, в состаренных образцах составляет $I_H=74\%$ ($800^\circ C$, 0,5 ч) и $I_H=66\%$ ($800^\circ C$, 10 ч).

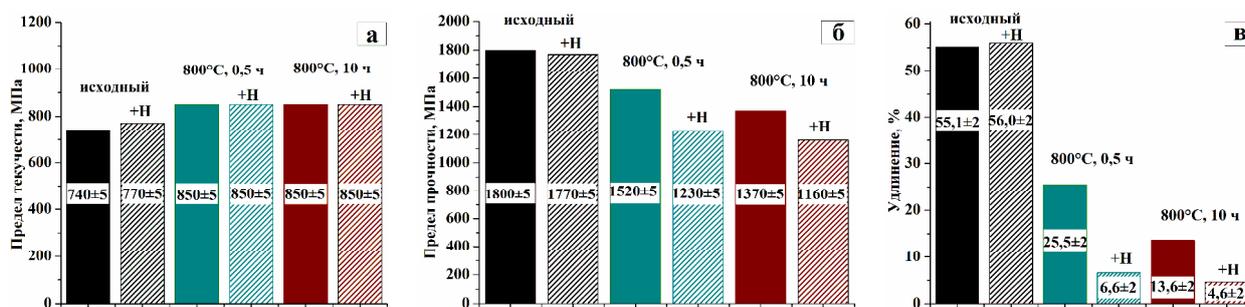


Рис. 2. Влияние продолжительности старения при температуре $800^\circ C$ и наводороживания на предел текучести (а), предел прочности (б) и удлинение (в) исследуемой стали

Закключение. В исходном закаленном состоянии образцы ВАС обладают аустенитной структурой с крупными частицами $(V,Cr)(C,N)$. При старении $800^\circ C$ в течение 0,5 и 10 ч протекает комплексная реакция прерывистого и непрерывного распада аустенита, при которой образуются ячейки и пластины нитрида хрома $Cr_2(N,C)$ по границам аустенитных зерен и наноразмерные нитриды ванадия в теле зерна. При продолжительном старении (10 ч) также происходит выделение интерметаллидной σ -фазы. Наводороживание вызывает слабые эффекты твердорастворного упрочнения, но не приводит к потере пластичности закаленных образцов ВАС. В состаренных образцах после наводороживания в течение 100 ч наблюдается значительное снижение пластичности ($I_H=74,1\%$ после старения по режиму $800^\circ C$ 0,5 ч, $I_H=66,2\%$ после старения по режиму $800^\circ C$, 10 ч).

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. – P.105–123.
2. Pettersson N., Frisk K., Fluch R. Experimental and computational study of nitride precipitation in a CrMnN austenitic stainless steel. // Mater. Sci. Eng. A. – 2017 – Vol.684 – P.435-441.
3. Li J., Wu J., Wang Z., Zhang S., Wu X., Huang Y., Li X. The effect of nanosized NbC precipitates on electrochemical corrosion behavior of high-strength low-alloy steel in 3.5%NaCl solution // Hydrogen Energ. – 2017 – Vol.42 – P.22175-22184.