

Исследование водородоустойчивости стали типа X16H6 с различным содержанием углерода

Исследовано влияние газообразного водорода на механические характеристики и сопротивление разрушению сталей типа X16H6 с различным содержанием углерода – 0,04 и 0,07 %. Показано, что с повышением содержания углерода растворимость водорода в стали типа X16H6 увеличивается. Сталь с 0,04 % углерода обладает преимуществом перед сталью с 0,07 % углерода по показателям водородоустойчивости и склонности к хрупкому разрушению в условиях эксплуатации оборудования в водородсодержащих средах при высоких температурах и давлениях.

Ключевые слова: аустенитно-мартенситные стали, водородная коррозия, водородоустойчивость, лабораторные исследования, механические характеристики, микроструктурные исследования

Аустенитно-мартенситные стали широко используются для изготовления оборудования гидроэнергетических процессов, особенностью работы которого связано с длительным воздействием водорода на металл при высоких температурах и давлениях. Как известно, отрицательное воздействие водорода проявляется в развитии процессов водородной коррозии и водородной хрупкости. Процесс водородной коррозии сопровождается межкристаллитным растрескиванием и необратимым снижением прочности и особенно пластичности [1, 2]. Поэтому, актуальным является исследование водородоустойчивости стали, под которой следует понимать стабильность карбидных фаз в присутствии водорода, а также стойкость против возникновения водородной хрупкости (в напряженном состоянии при высоких концентрациях водорода).

В настоящей работе исследовано влияние газообразного водорода на механические характеристики и сопротивление разрушению сталей типа X16H6 с различным (0,04 и 0,07 %) содержанием углерода. В исходном состоянии сталь подвергалась следующей термической обработке: нагреву до температуры 975-1000 °С, выдержке при этой температуре 15 мин., охлаждению на воздухе, обработке холодом до -70 °С и отпуску при температуре 425 °С в течение двух часов. Следует заметить, что при обработке холодом 80-90 % аустенита превращается в мартенсит [3], а высокотемпературный отпуск способствует выделению карбидных частиц, которые, искажая кристаллическую решетку, препятствуют движению дислокаций, что вызывает упрочнение стали. Остаточный аустенит в структуре стали механически стабилен и не претерпевает γ - α превращения при нагружении.

Растворимость водорода, то есть проникновение атомарного водорода вглубь металла, а также его пороговая концентрация, необходимая для развития водородной хрупкости, зависят от структурного содержания стали. Для мартенситной структуры стали характерными участками скопления водорода являются области объемного расширения, образованные

в местах выхода кристаллов мартенсита на границы исходного аустенитного зерна [4, 5].

Накопленный экспериментальный материал [1] позволил сделать вывод о том, что решающим фактором, обеспечивающим водородостойкость сталей, является природа карбидной фазы. К тому же для аустенитно-мартенситных сталей – абсолютное количество углерода и хрома в их составе, а также наличие других элементов в карбидной составляющей, например, железа в карбидах хрома при связывании всего углерода в кубический карбид $(Cr, Fe)_{23}C_6$.

Кинетику насыщения исследованных сталей водородом изучали по следующей методике.

Цилиндрические образцы длиной 5 мм и диаметром 4 мм в специальных автоклавах насыщали газообразным водородом при температуре 200 °С и всестороннем давлении газа 40 МПа. После выдержки в этих условиях в течение заданного времени (25, 50 и 240 ч) автоклав подвергали быстрому охлаждению в воде (до комнатной температуры) с целью уменьшения потерь поглощенного образцами водорода, так как после снятия давления при медленном охлаждении водород обратно выделяется во внешнюю среду. Содержание водорода определяли с помощью анализатора водорода методом плавления в токе газа-носителя. Насыщение сталей с содержанием углерода 0,04 и 0,07 % показано на рис. 1, где видно, что растворимость водорода выше в стали с 0,07%-ным содержанием углерода, чем с 0,04. Это можно связать с увеличением количества «ловушек» водорода (микронесплошности, единичные вакансии) вследствие искажения кристаллической решетки, вызванного большим содержанием углерода. При этом максимум на кривой насыщения стали с 0,04 % С сдвигается в область более длительного времени выдержки.

Анализ микроструктуры образцов в исходном состоянии (рис. 2) показал, что структура стали с 0,04 % углерода содержит игольчатый мартенсит и приблизительно 5 % остаточного аустенита, в стали с 0,07 % углерода количество остаточного аустенита – 10-15 %. После наводороживания содержание остаточного аустенита изменилось только в стали

$S_H, \text{cm}^3/100 \text{ г}$

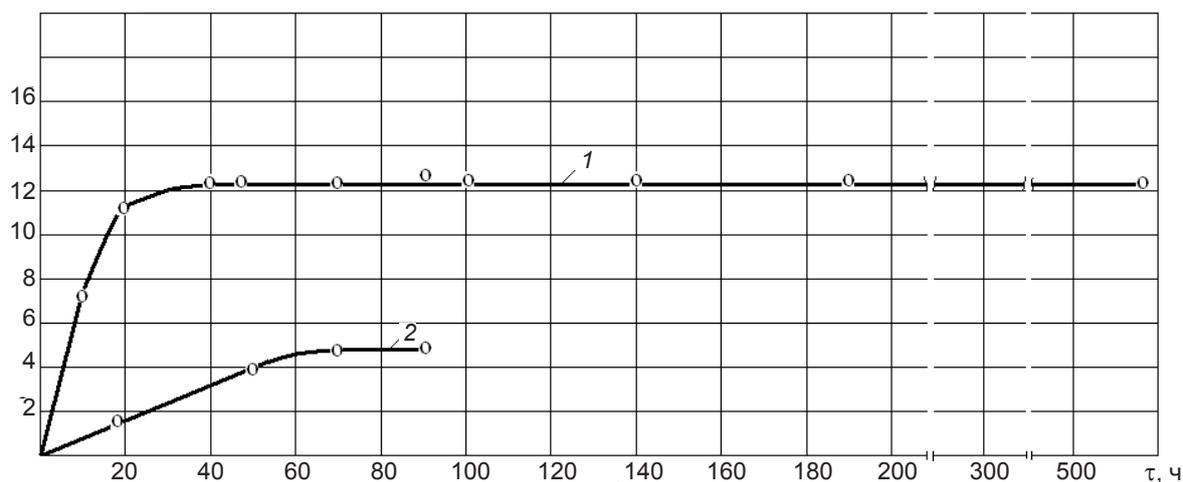


Рис. 1. Влияние времени выдержки на содержание водорода в образцах из сталей 07X16H6 (1) и 04X16H6 (2) при давлении водорода 40 МПа и температуре 200 °С



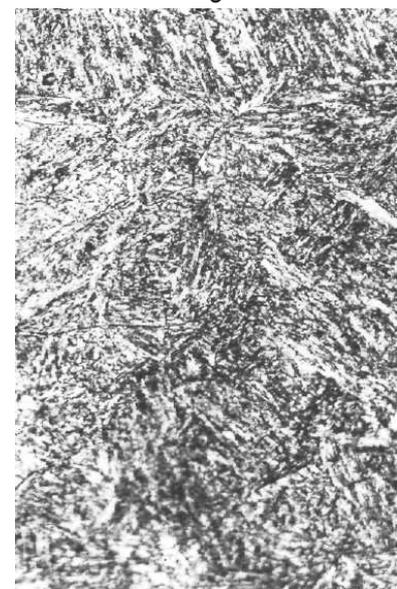
а



б



в



г

Рис. 2. Микроструктура образцов сталей 04X16H6 (а, б) и 07X16H6 (в, г) в исходном состоянии (а, в) и после насыщения водородом (б, г) при давлении 40 МПа и температуре 200 °С в течение 240 ч., $\times 500$

с 0,04 % С – возросло почти в два раза (до 7-10 %).

Рассмотрим влияние продолжительности выдержки образцов под всесторонним давлением водорода 40 МПа при температуре 200 °С на механические характеристики исследованных сталей (рис. 3). Заметим, что склонность стали к водородной хрупкости принято оценивать путем сравнения механических характеристик металла после воздействия водорода с таковыми в исходном состоянии. Из представленных в таблице данных видно, что длительность насыщения образцов водородом практически не сказывается на изменении предела прочности σ_B , условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, то есть на характеристиках, не связанных с разрушением, но резко снижает характеристики, связанные с разрушением, представленные пластическими свойствами материала – относительное сужение ψ , относительное удлинение δ , истинное сопротивление разрыву S_k . Так, после выдержки 240 ч пластические свойства стали с 0,07 % С значительно снизились: ψ – на 44, δ – на 22 и S_k – на 33 %. В то же время указанные характеристики для стали с 0,04 % С снизились на 5, 8 и 14 % соответственно. Эти данные свидетельствуют о том, что чувствительность к водородной хрупкости возрастает с увеличением прочности стали, и сталь с меньшим содержанием углерода (0,04 %) – более водородоустойчивая и менее склонна к водородной хрупкости.

Изучено влияние концентрации напряжений как фактора, оказывающего влияние на сопротивление

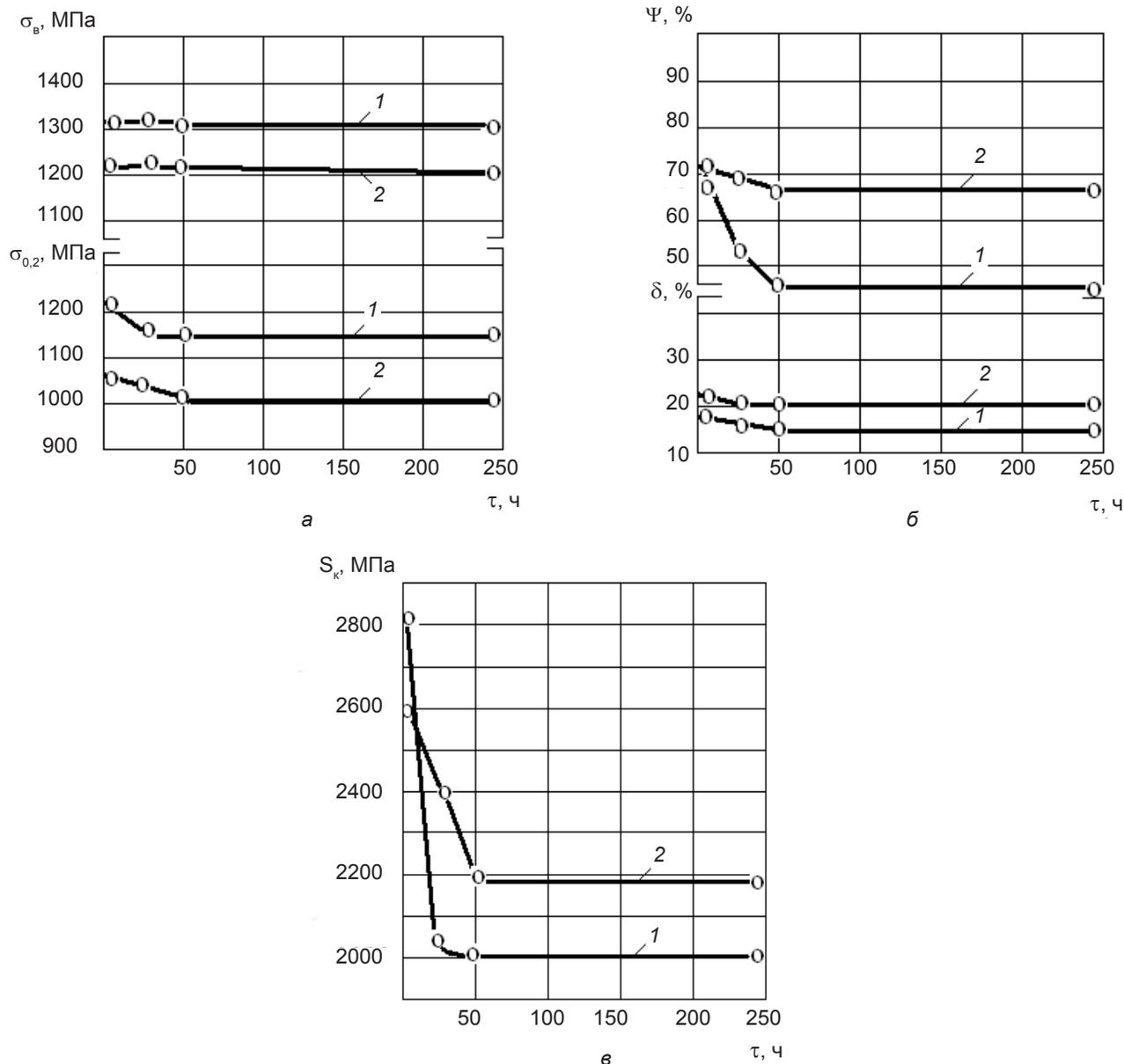


Рис. 3. Изменение механических характеристик (а, б, в) сталей 07X16H6 (1) и 04X16H6 (2) в зависимости от продолжительности воздействия водорода при давлении водорода 40 МПа и температуре 200 °С

металла пластической деформации и на склонность к водородной хрупкости. С этой целью испытанию подвергли цилиндрические образцы стали с 0,04 % углерода с кольцевым надрезом, радиусом (r) в вершине 0,63 и 0,02 мм. Для таких надрезов коэффициент концентрации напряжений K_T равен 1,96 и 8,5 соответственно. Оценочной характеристикой служило номинальное разрушающее напряжение в сечении нетто σ^H и чувствительность к надрезу (к концентрации напряжений), определяемая отношением σ^H к пределу прочности гладкого образца σ_b . Упрочнение в надрезу образцов наблюдалось как в исходном состоянии, так и при насыщении, но с увеличением времени выдержки в водороде рост величины σ^H менее интенсивен.

Сопоставление результатов испытаний образцов с надрезами (рис. 4) показывает, что в то время как разрушающее напряжение образца с надрезом $r = 0,63$ мм практически не меняется или даже растет с увеличением времени выдержки, разру-

шающее напряжение образца с острым надрезом $r = 0,02$ мм существенно снижается. При K_T равном 1,96 ($r = 0,63$ мм) сталь можно оценить как нечувствительной к водородонасыщению. Об этом свидетельствует неизменность величины σ^H/σ_b . Острый надрез ($r = 0,02$ мм) приводит к упрочнению стали почти в 2 раза в исходном состоянии и резкому снижению прочности при насыщении водородом в течение 25 ч. При дальнейшем насыщении чувствительность к надрезу не изменяется. С учетом того, что надрез способствует стеснению пластических деформаций при нагружении, причем, с увеличением остроты надреза уменьшаются пластически деформированные объемы металла в образце, способность материала пластически деформироваться при наличии концентраторов напряжений можно оценивать с помощью соотношения $\sigma^H/\sigma_{0,2}$. Результаты указали на высокую вязкость стали в надрезу в исходном состоянии. Насыщение водородом практически не изменяет величину $\sigma^H/\sigma_{0,2}$ для образцов с надрезом 0,63 мм, в то же время

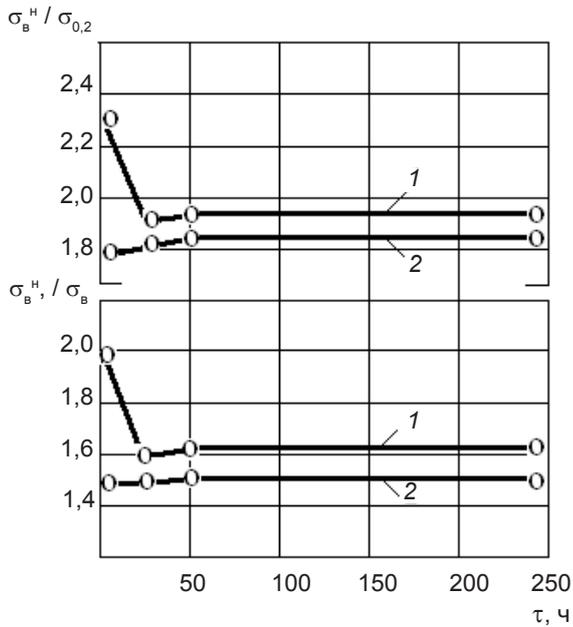


Рис. 4. Влияние продолжительности воздействия водорода на чувствительность к концентрации напряжений стали 04X16H6, радиус надреза, мм: 1 – 0,02; 2 – 0,63

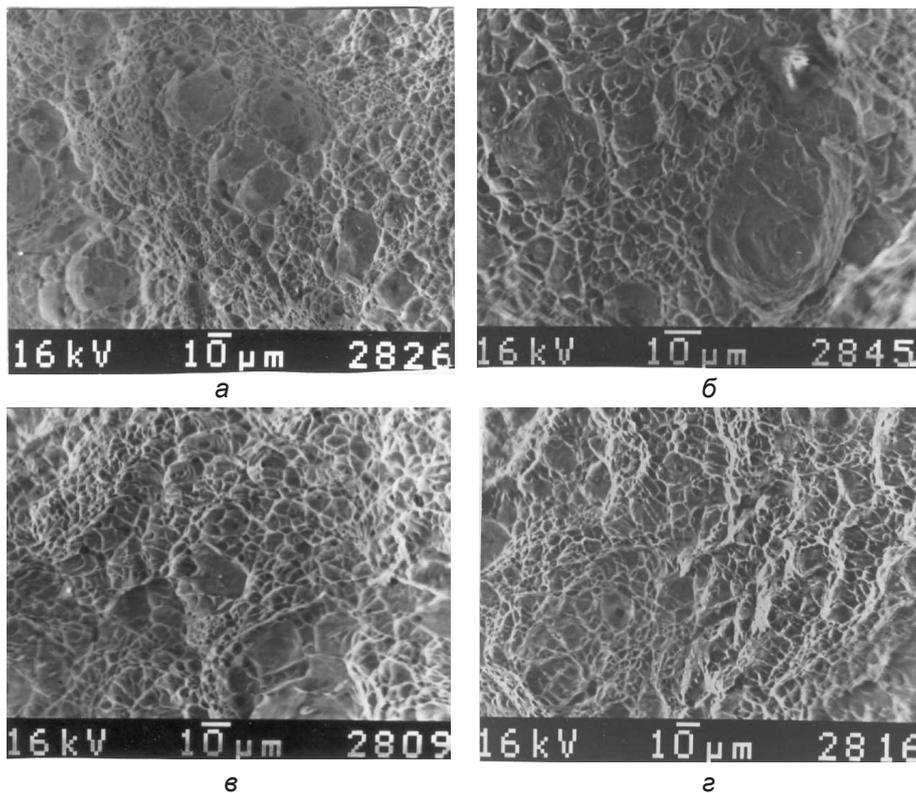


Рис. 5. Микростроение излома образцов из стали 04X16H6 с радиусом надреза 0,63 мм (а, б) и 0,02 мм (в, г): а, в – исходное состояние; б, г – насыщение водородом; ×500

происходит ее резкое понижение для острого надреза при выдержке образцов 25 ч, что объясняется значительным уменьшением пластически деформированной зоны, и при дальнейшем насыщении деформационная чувствительность к надрезу не изменяется.

Таким образом, испытания образцов с надрезом разной величины позволяют выявлять особенности состояния стали при воздействии водорода высоких параметров.

Фрактографический анализ изломов (рис. 5) показал, что разрушение испытанных образцов происходит по механизму ямочного отрыва путем слияния микропор. На этот механизм разрушения не влияет содержание углерода в стали. Водородное воздействие приводит к фрагментации рельефа с образованием в изломе вытянутых гребней. Такое строение возникает в результате пластической деформации при разрушении перемычек при росте и слиянии микропустот, возникающих на участках расположения упрочняющей мартенситной фазы. Разрушение надрезанных образцов независимо от остроты надреза также носит вязкий характер.

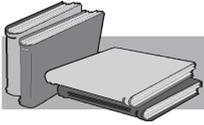
Выводы

С повышением содержания углерода растворимость водорода в стали типа X16H6 увеличивается, при этом максимум на кривой насыщения сдвигается в область меньшего времени выдержки.

Длительность насыщения образцов водородом практически не сказывается на изменении характеристик прочности $\sigma_{\text{в}}$ и $\sigma_{0,2}$, но резко снижает характеристики, связанные с разрушением – относительное сужение δ , относительное удлинение δ , истинное сопротивление разрыву S_k .

В присутствии надреза в результате одновременного воздействия двух факторов – максимального напряжения и высокой концентрации растворенного водорода механизм разрушения исследованной стали с 0,04 % содержания углерода не изменяется, сохраняя вязкий характер.

Сталь типа X16H6 с 0,04 % C обладает преимуществом перед сталью с 0,07 % C по показателям водородоустойчивости и склонности к хрупкому разрушению в условиях эксплуатации оборудования в водородсодержащих средах при высоких температурах и давлениях.



ЛИТЕРАТУРА

1. Арчаков Ю.И. Современные проблемы водородной коррозии сталей и надежность эксплуатации оборудования гидрогенизационных процессов // Водородная обработка материалов: Тр. III Междунар. конф. «ВОМ-2001». – Донецк, 2001. – С. 482-491.
2. Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов. – М.: Metallurgy, 1985. – 217 с.
3. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Metallurgy, 1977. – 647 с.
4. Гельд П. В., Рябов Р. А. Водород в металлах и сплавах. – М.: Metallurgy, 1974. – 273 с.
5. Гельд П. В., Рябов Р. А., Кодекс Е. С. Водород и несовершенства структуры металла. – М.: Metallurgy, 1979. – 273 с.

Анотація

Стасюк С. З.

Дослідження водневої стійкості сталі типу X16H6 з різним вмістом вуглецю

Досліджено вплив газоподібного водню на механічні характеристики і опір руйнуванню сталей типу X16H6 з різним вмістом вуглецю – 0,04 і 0,07 %. Показано, що з підвищенням рівня вуглецю розчинність водню в сталі збільшується. Сталь з 0,04 % С має перевагу перед сталлю з 0,07 % С за показниками водневої стійкості і схильності до крихкого руйнування в умовах експлуатації обладнання з середовищем із вмісту водню за високих температур і тиску.

Ключові слова

аустенітно-мартенситні сталі, воднева корозія, воднева стійкість, лабораторні дослідження, механічні характеристики, мікроструктурні дослідження

Summary

Stasiuk S. Z.

Hydrogen stability investigation of steel type X16H6 with different carbon maintenance

The influence of gaseous hydrogen on mechanical description and resistance to destruction steels type X16H6 with different carbon maintenance – 0,04 and 0,07 % was investigated. It was shown that with increase of carbon content the hydrogen solubility in steel type X16H6 was augmented. The steel with 0,04 % C has preference to steel with 0,07 % C on indices of hydrogen stability and tendency to fragile destruction with operation conditions of equipment in hydrogen maintenance environment with high temperatures and pressures.

Keywords

austenites martensites steels, hydrogen corrosion, hydrogen stability, laboratory investigation, mechanical properties, microstructure researches

Поступила 20.05.14