

4. Вычисления гнutoго колена паропровода с овалностью 0 % на длительную прочность показали, что этот элемент паропровода может работать до 100000 циклов, а с овалностью 6 % - 4230 циклов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rudzinskas V., Valiulis A. V., Cernashejus O. Analysis and Calculation of Long-Term Cyclic Strength of Steam Lines Units // *Mechanika*, Nr. 3(29). Kaunas: Technologija, 2001, p. 17-21.
2. Rudzinskas V., Valiulis A. V., Cernashejus O., Vishniakov N. Dynamics of properties and structure changes of pearlite steel during long-lived operation // *Materials Science*, Nr.2(9). Kaunas: Technologija, 2003, p. 164-169.
3. Raymond K., Marvin J. Creep relaxation behavior of high-energy piping // *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 122, 2000, p. 488-493.
4. Jang G.B., Kim H.K., Kang S.S. The Effects of Root Opening on Mechanical Properties. Deformation and Residual Stress Of Weldments.-*Welding Journal*, 2001, Nr.4, p.80-s to 89-s.
5. Carter P. Stress analysis and design for cyclic loading // *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 122, 2000, p. 427-430.
6. Hashem M. Mourad. Maher Y.A. Younan. Nonlinear Analysis of Pipe bends Subjected to Out-of-Plane Moment Loading and Internal Pressure // *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 123, 2001, p. 253-258.
7. Takashi Ogata, Masatsugu Yaguchi. Study on Creep-Fatigue Damage Evaluation for Boiler Weldment Parts // *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 123, 2001, p. 105-111.

УДК 621.891

Станкевич А., Рудзинскас В.

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА СТАЛЬ И СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ЕГО КОЛИЧЕСТВА В СТАЛИ И СВАРНЫХ ШВАХ

*Вильнюсский технический университет им.Гедиминаса
Вильнюс, Литва*

1. ВВЕДЕНИЕ

Источники появления и формы существования водорода в стали. В стали, еще несоприкасавшейся с агрессивными по водороду рабочими средами, может содержаться так называемый «металлургический» водород. Он попадает в сталь в процессе выплавки, когда шлак на поверхности расплава насыщается парами воды, откуда происходит дальнейшая диффузия водорода вглубь расплава [1], в результате контакта расплавленного металла с печной атмосферой,

различными добавками, вводимыми в ванну, а также переходит из чугуна и скрапа, содержащих водород как в растворенном в металле виде, так и в форме ржавчины, включающей гидраты окислов железа. Содержание водорода в кислой мартеновской стали может достигать до $30-50 \text{ см}^3/\text{кг}$, а в основной $50-90 \text{ см}^3/\text{кг}$. При разливе стали с помощью вакуумной обработки жидкого металла в ковше содержание водорода снижается (до $20 \text{ см}^3/\text{кг}$), а при обработке жидкой стали паром – может возрасти.

Возможно повышение содержания водорода в металле в результате термической обработки в восстановительных атмосферах и некоторых других технологических процессов изготовления оборудования.

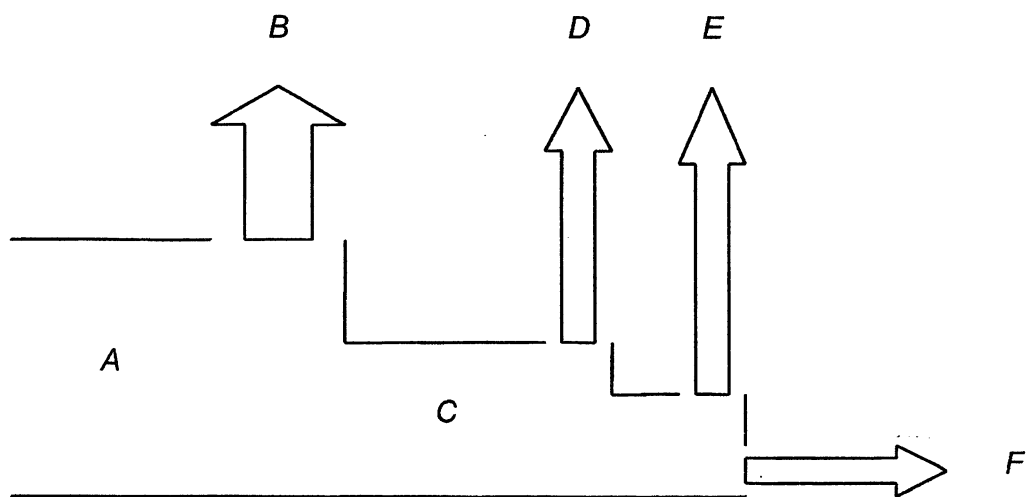


Рис. 1. Источники появления и формы существования водорода в стали

На рисунке 1 представлены источники появления, и формы существования водорода в стали. Из потока водорода *A*, разрядившегося на металле, часть водорода *B* молизуется на внешней поверхности и в виде пузырьков газа удаляется из раствора; другая часть водорода *C* внедряется в кристаллическую решетку металла. При этом выделяется и молизуется часть поглощенного водорода *D* во внутренних коллекторах (пустотах). Часть водорода *E* диффундирует сквозь толщу металла и выделяется на противоположной стороне, а остаток водорода *F* в протонной форме остается в твердом растворе.

Наводороживанием может сопровождаться и сварка в результате контакта металла с кристаллизационной и гигроскопической влагой, содержащейся в электродных покрытиях и флюсах, а также с ржавчиной: в металле швов и околошовной зоне может содержаться до $100-1080 \text{ см}^3/\text{кг}$ водорода.

Влияние внутренних и внешних факторов на наводороживание стали. Проникновение водорода в сталь увеличивается с повышением содержания в ней до $0,9\%$ углерода. Дальнейшее увеличение количества углерода сопровождалось замедлением наводороживания. Легирующие примеси относительно мало влияют на растворимость и диффузию водорода в стали в том случае, если

их введение не сопровождается структурными (фазовыми) превращениями. Отмечается незначительное влияние на наводороживание добавок никеля, хрома, молибдена, кремния и марганца. Предполагается, что гидрообразующие элементы (Ti, V, Zr, Cr, Nb и др.) удерживают водород в кристаллической решетке и тормозят его десорбцию и молизацию.

Более заметное влияние на наводороживание оказывает структура стали. Наблюдается значительно большая растворимость водорода в сталях с гранцентрированной решеткой (аустенит), чем с объемцентрированной (феррит). Для диффузии имеет место обратная зависимость, т.е. диффузия водорода в α -железе при прочих равных условиях происходит быстрее, чем в γ -железе [3]. Таким образом, при прочих равных условиях в чистом железе (а также в низкоуглеродистой стали) диффузия водорода протекает в 1000 раз быстрее, чем в сталях со структурой аустенита и в 10 раз быстрее, чем в хромистой нержавеющей (ферритной) стали.

Считается, что поглощение водорода определяется в основном дефектами кристаллической решетки и наличием в металле коллекторов, где может аккумулироваться молекулярный водород. При прочих неизменных условиях проникновение водорода в углеродистую сталь заметно растет при переходе от мартенситной к другим видам структур (троостит, сорбит, перлит).

Наводороживание усиливается при переходе от насыщения стали с недеформированной решеткой к стали с искаженной решеткой вследствие холодной деформации, а от последней к стали, наводороживание которой осуществляется в процессе деформации. Процессы деформации сдвига, сопровождающие, например скручивание, способствуют внедрению водорода в металл. Усиление адсорбции водорода в результате холодной деформации объясняется зарождением микротрещин, сливающихся в микрополости [2].

Влияние водорода на физико-механические свойства стали. Значительные изменения при наводороживании претерпевают пластические свойства стали. В результате проникновения водорода относительное удлинение δ и поперечное сужение ψ заметно снижаются. При этом ψ снижается более интенсивно, чем δ . Отмечается близкое к линейному снижению ψ с увеличением содержания водорода в стали.

Предел прочности стали при поглощении водорода ненагруженными образцами несколько снижается. Ударная вязкость стали при обычных температурах испытания в результате наводороживания резко падает.

Значительное ухудшение механических свойств в результате наводороживания приводит к возникновению так называемой «водородной хрупкости» стали. Разрушение при этом происходит под действием напряжений, которые могут иметь как статический, так и циклический характер (в последнем случае наступает водородная усталость). Величины указанных разрушающих напряжений значительно меньше соответствующих характеристик разрывной и усталостной прочности ненаводороженной стали [2]. Кроме того, наводороживание

как указывалось выше, при соответствующем возрастании давления газообразного водорода во внутренних полостях металла может вызвать расслоение (пузырение) стали. Этот вид разрушения может иметь место и при отсутствии внешней нагрузки [4].

Способы уменьшения количества водорода в стали и сварных швах. Количество «металлургического» водорода в стали можно уменьшить при разливке стали, применяя вакуумную обработку жидкого металла в ковше [2]. Для этого используются сухие вакууматоры, которые позволяют уменьшить массовую долю водорода в стали до 1,5 ppm [1].

Количество водорода в кристаллизовавшихся слитках можно уменьшить термической обработкой. Обезводороживающий отжиг блюмсов (600-700° С) способствует уменьшению содержания водорода ниже 20 см³/кг и равномерному распределению его по сечению [2].

Сварка несколькими проходами уменьшает вероятность появления трещин, возникших из-за воздействия водорода, т.к. каждый новый проход выполняет термическую обработку ранее сваренных слоев. Предварительный подогрев или термическая обработка после сварки также уменьшает вероятность появления трещин, возникших из-за воздействия водорода. Этим уменьшается твердость и водороду предоставляется достаточно времени десорбировать из сварного шва [3].

Влияние температуры предварительного отпуска на насыщение водородом имеет экстремальный характер.

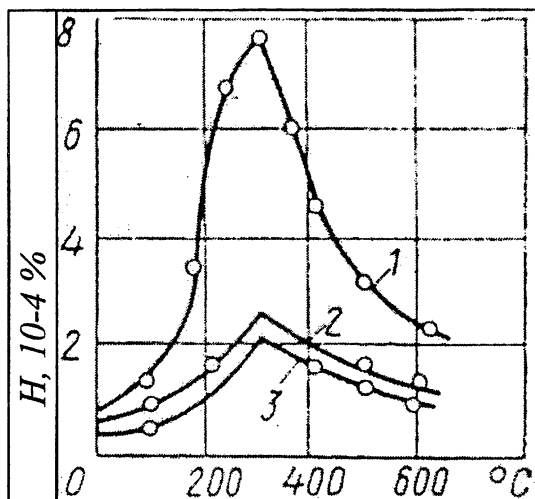


Рис.2. Зависимость концентрации насыщения водородом от температуры отпуска сталей с содержанием углерода: 1 – 0,99%; 2 – 0,22%; 3 – 0,16%

Другой способ уменьшить количество водорода в сварном шве это использование флюсов, содержащих ионы фтора (F⁻¹), напр. CaF₂, KF, MnF₃, K₃AlF₆. это происходит из-за того, что фтор реагирует с водородом в атмосфере дуги, в результате чего образуется соединение HF, которое удаляется из шва со

шлаком [6].

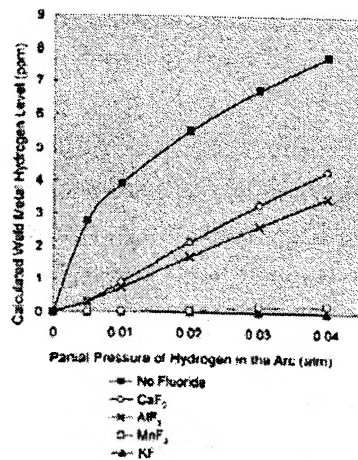


Рис.3. Исследования показали, что флюсы со фтором хорошо защищают сварной шов от водорода. Наилучшие результаты показали флюсы с CaF₂ и KF [6]

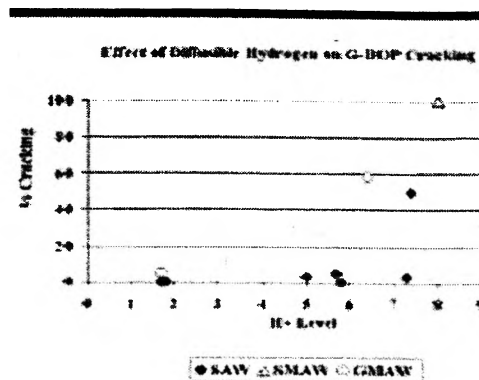


Рис. 4. Образцы стали HPS 70W (C – 0,1%, Mn – 1,2%, Si – 0,3%, Cr – 0,52%, Ni – 0,35%) были обварены близкими по химическому составу сварочными материалами разными сварочными процессами: под флюсом (SAW), ручной дуговой сваркой покрытыми электродами (SMAW) и полуавтоматической сваркой в активном газе (GMAW); в наводороживающей среде

Количество водорода в сварном шве зависит и от сварочного процесса. Исследования показали, что наименее чувствительный к возникновению трещин, возникших из-за воздействия водорода, сварочный процесс – сварка под флюсом (SAW); более чувствительный – полуавтоматическая сварка в среде активного газа (GMAW); наиболее чувствительный – ручная дуговая сварка покрытыми электродами (SMAW) [7].

Количество водорода в шве зависит и от параметров сварки. Количество водорода в сварном шве существенно уменьшается при сварке с малым напряжением дуги. Это происходит из-за того, что при большем напряжении дуга может удлиниться настолько, что атмосфера дуги будет не в состоянии защитить от влаги окружающей среды [8].

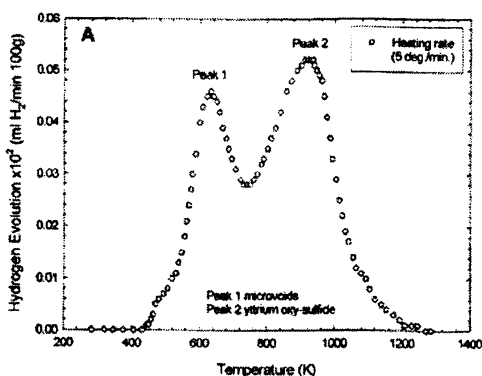
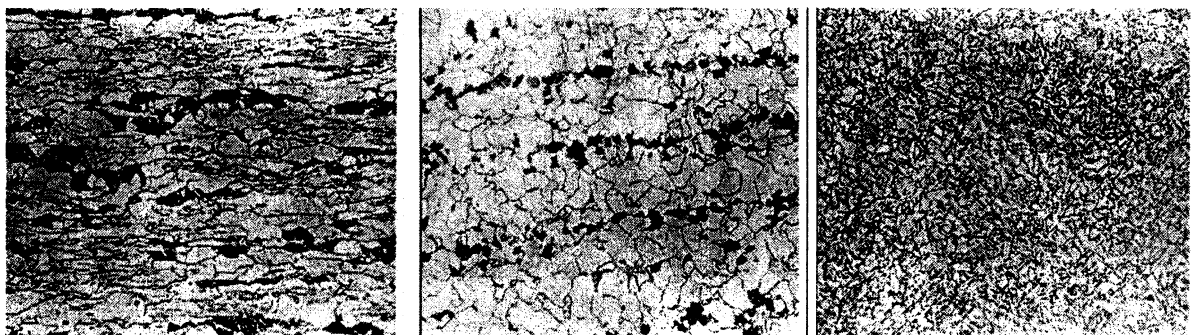


Рис.5. Образцы стали HSLA 100 (C – 0,063%, Mn – 0,94%, Si – 0,23%, Cr – 0,04%, Ni – 2,92%, Mo – 0,49%) были обварены электродами с составом: C – 0,06%, Mn – 1,2%, Si – 0,3%, Ni – 2,5%, Mo – 0,5%. Один образец остывал на воздухе (получено 4% остаточного аустенита), другой – в жидком азоте (0% остаточного аустенита). После этого образцы были наводорожены

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Термическая обработка металла способствует улучшению его сопротивляемости водородной коррозии. Исследования образцов стали API-5L-X60 (C – 0,09%, Mn – 0,82%, Si – 0,26%, Cr – 0,021%, Ni – 0,2%, Mo – 0,3%) по методу NACE TM 0177-96 на сопротивляемость водородной коррозии в среде сероводорода показали, что менее всего подвержена водородной коррозии.



вальцованная

нормализованная

улучшенная закаленная
и отпущенная

Рис.6. Образцы стали API-5L-X60 (C – 0,09%, Mn – 0,82%, Si – 0,26%, Cr – 0,021%, Ni – 0,2%, Mo – 0,3%) были испытаны по методу NACE TM 0177-96 на склонность к водородному растрескиванию в среде H₂S. Испытания показали, что водородное растрескивание не произошло только в улучшенной закаленной и отпущенной стали с однородной структурой бейнит/мартенсит

У границы сплавления шва образуется мартенсит, твердость которого превышает 400 HV. При деформации образца поперек сварному шву у границы сплавления шва образовалась трещина, идущая вдоль границы сплавления.

Исследования образцов, сваренных из разнородных сталей (аустенит и феррит), показали, что трещины, возникшие из-за воздействия водорода, появляются в зоне металла шва с мартенситной фазой, обладающей большой твер-

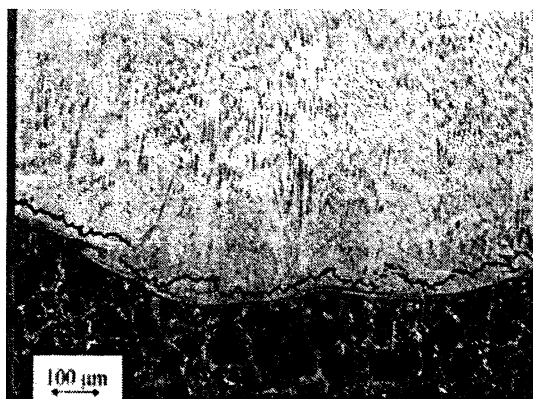


Рис. 7. Образец стали А36 (С – 0,09%, Мп – 0,71%, Si – 0,18%, Cr – 0,09%, Ni – 0,13%, Мо – 0,05%) был обварен сварочным материалом ER308 (Cr – 20,51%, Ni – 9,69%) в наводороживающей среде

достью (400-550 HV). В зонах, где твердость была меньше 350 HV, трещин, возникших из-за воздействия водорода, обнаружено не было.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перспективные технологии вакуумирования – Intech Vacuum, 2004.
2. А.Шрейдер, И.Шпарбер, Ю.Арчаков. Влияние водорода на нефтяное и химическое оборудование – Москва, Машиностроение, 1976.
3. Y.D.Park, I.S.Maroeef, A.Landau, D.L.Olson. Retained Austenite as a Hydrogen Trap in Steel Welds – Welding Journal, 2002
4. R.A.Carneiro. The influence of chemical composition and microstructure of API linepipe steels on hydrogen induced cracking and sulfide stress corrosion cracking – Materials Science and Engineering, 2003.
5. M.D.Rowe, T.W.Nelson, J.C.Lippold. Hydrogen-Induced Cracking along the Fusion Boundary of Dissimilar Metal Welds – Welding Research Supplement, 1999
6. M.Matsushita, S.Liu. Hydrogen control in Steel Weld Metal by Means of Fluoride Additions in Welding Flux – Welding Research Supplement, 2000.
7. G.Atkins, D.Thiessen, N.Nissley, Y.Adonyi. Welding Process Effects in Weldability Testing of Steels – Welding Journal, 2002.
8. C.A.Lensing, Y.D.Park, I.S.Maroeef, D.L.Olson. Yttrium Hydrogen Trapping to Manage Hydrogen in HSLA Steel Welds – Welding Journal, 2004.