

## ВОДОРОДИНДУЦИРОВАННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ

З.Ш. Саъдуллаев

старший преподаватель ,Алмалыкский филиал Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, кафедры технологических машин и оборудования.

**Аннотация:** В отсутствие точного механизма водородного охрупчивания были разработаны методы, позволяющие избежать ВИР в большинстве конструкционных материалов, особенно в сталях. Модификация и контроль состава, условий сварочного процесса и микроструктуры можно эффективно использовать, чтобы избежать этой формы растрескивания сварного шва. На практике предотвращение ВИР может быть достигнуто в большинстве случаев благодаря применению соответствующих процедур.

**Ключевые слова:** Генерация, водород, диффузия, сварка.

Присутствие водорода в металле сварного шва или ЗТВ может привести к образованию трещин, известных как водород-индуцированное растрескивание (ВИР). Эту форму растрескивания также обычно называют «растрескивание в присутствии водорода» (РПВ) или «холодным растрескиванием», поскольку оно происходит при комнатной температуре или около нее после охлаждения сварного шва. Потеря пластичности, связанная с присутствием водорода, часто называется водородным охрупчиванием. Эта форма растрескивания чаще всего связана со сталями, но присутствие достаточного количества водорода может привести к растрескиванию или охрупчиванию в других материалах.

Хотя водород присутствует на некотором следовом уровне практически во всех материалах, именно введение водорода в процессе сварки позволяет присутствовать водороду на некотором пороговом уровне, чтобы способствовать растрескиванию. Атомарный водород очень подвижен в микроструктуре даже при комнатной температуре, что позволяет ему диффундировать в области концентрации напряжений и области склонной микроструктуры.

Хотя ВИР обычно происходит почти сразу после охлаждения до комнатной температуры, это может также произойти после определенного периода времени. Эта форма ВИР называется «замедленным» растрескиванием. Это говорит о том, что для диффузии и накопления водорода необходим инкубационный период в месте, где происходит растрескивание после достижения порогового уровня водорода.

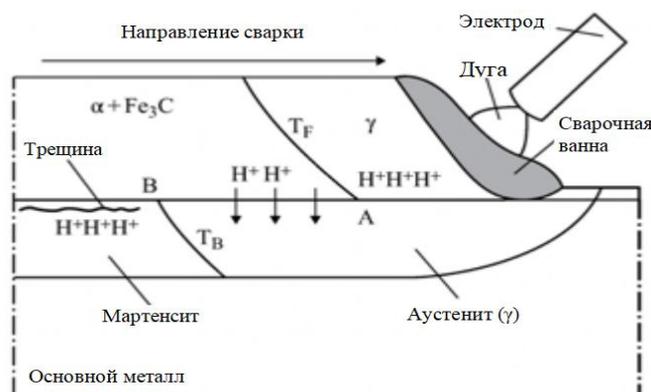
Несмотря на то, что водородное растрескивание и его варианты изучались в течение более 60 лет, до сих пор нет общепринятого видения механизма. Отчасти это связано с тем, что водород очень трудно обнаружить с помощью аналитических инструментов. В отличие от других следовых элементов (P, S, B, O), которые приводят к растрескиванию или охрупчиванию, водород в микроструктуре эффективно не обнаруживается. Компьютерное моделирование улучшило понимание поведения водорода в металлах, и был достигнут значительный прогресс в прогнозировании охрупчивания.

### ТЕОРИИ ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ

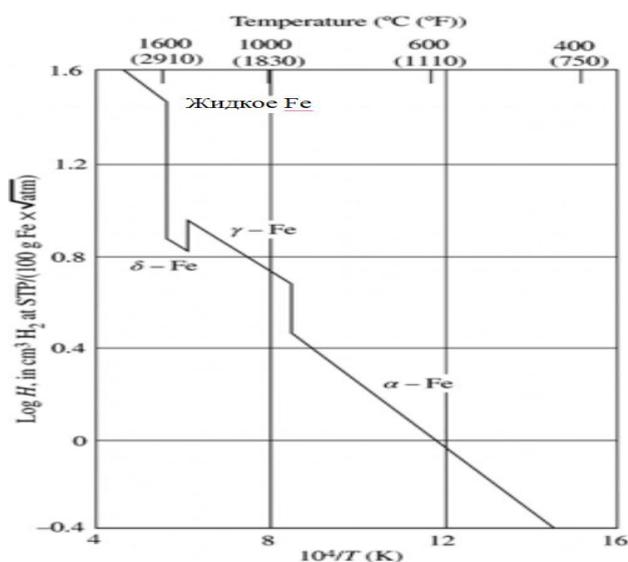
ВИР чаще всего ассоциируется со сваркой из-за того, что водород вводится в

сварочную ванну в процессе сварки. Высокие температуры в сварочной дуге приводят к диссоциации газообразного водорода, водяного пара и водородсодержащих соединений, что приводит к образованию атомарного водорода, который может легко абсорбироваться в расплавленной сварочной ванне и диффундировать в окружающую металлическую матрицу. Существует три основных источника водорода во время сварки: (1) влага в покрытии электрода, флюс, защитный газ и окружающая среда; (2) продукты разложения электродных покрытий целлюлозного типа и продукты горения при сварке газообразным кислородом; и (3), загрязняющие вещества, содержащие углеводороды (жир, масло, резка жидкость и т. д.) на поверхности присадочного металла и основной плиты перед сваркой.

Генерация водорода в металле шва, а затем его диффузия в ЗТВ, вызывающая растрескивание во время сварки, показаны на рисунке 1 [1]. Водород в атомарной форме довольно подвижен в расплавленной сварочной ванне и быстро диффундирует в окружающую ЗТВ. Как показано на рисунке 2, при повышенной температуре водород растворяется в железе, и его коэффициент диффузии достаточно высок [2].



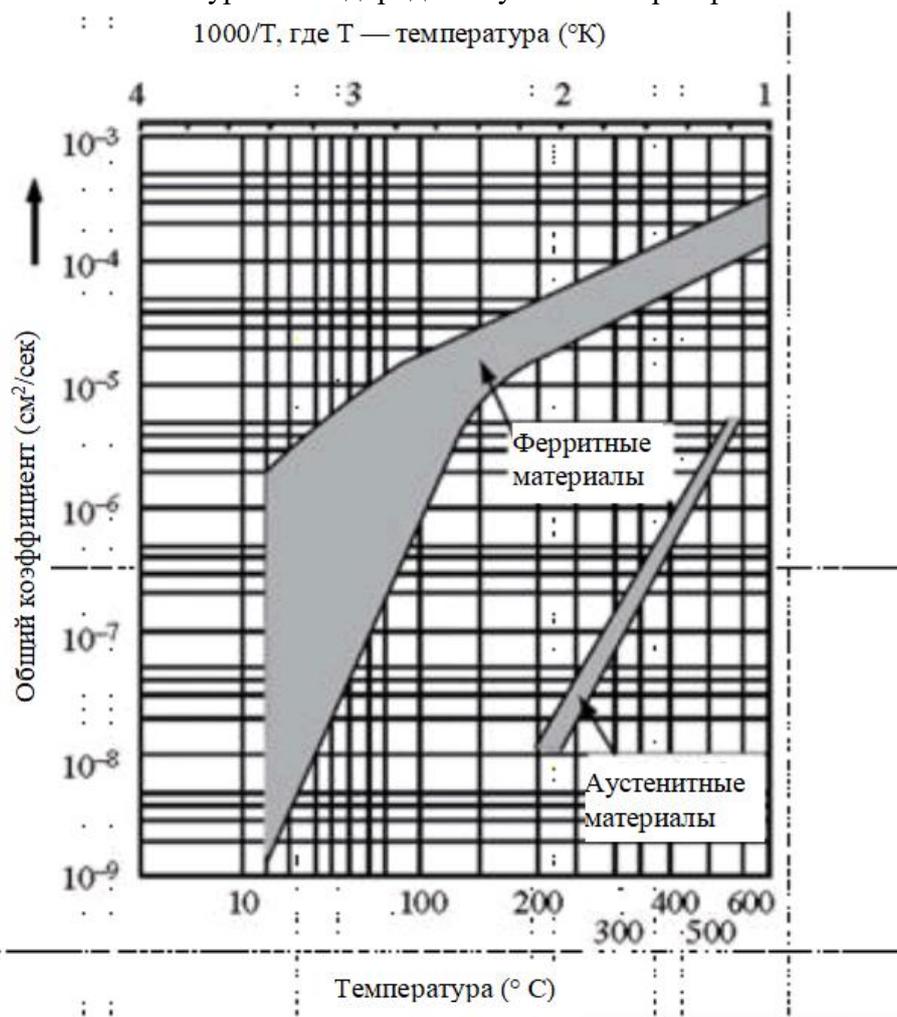
**Рисунок 1.** Диффузия водорода из металла шва в ЗТВ во время сварки (из [1],



**Рисунок 2.** Растворимость водорода в железе в зависимости от температуры (из [2],)

Когда металл шва и ЗТВ охлаждены до комнатной температуры, коэффициент диффузии водорода остается достаточно высоким, и водород способен рассеиваться на некоторое расстояние в ЗТВ. Данные по диффузии как для ферритных (ОЦК), так и для аустенитных (ГЦК) материалов приведены на рисунке 5.3 от Сое [3]. Даже при температуре ниже 100°C водород достаточно подвижен в ферритной микроструктуре. Это объясняет, почему сварные швы могут страдать от отложенного растрескивания, поскольку даже при комнатной температуре водород может диффундировать с заметной скоростью.

Из-за широко распространенных проблем с ВИР, связанных как со сваркой, так и с воздействием на изделие окружающей среды, механизм ВИР изучался с 1940-х годов. Было предложено ряд теорий, но до сих пор нет единого механизма. Вероятно, это связано с тем, что поведение водорода в материалах различно, а это объясняется различиями в кристаллической структуре, механизмах усиления, диффузионных характеристиках и других переменных. Среди всех конструкционных материалов ВИР является наиболее распространенным в стали из-за ее сложных процессов превращения (легкость образования твердого мартенсита), а также потому, что относительно низкие уровни водорода могут вызвать растрескивание.



**Рисунок 3.** Коэффициент диффузии водорода в феррите и аустените в зависимости от температуры (из [3].)

Ни один из предложенных механизмов не может всесторонне объяснить все явления, связанные с ВИР, и вполне возможно, что несколько механизмов работают совместно, вызывая растрескивание. Некоторые из наиболее популярных теорий, которые развивались в течение многих лет, излагаем кратко.

#### Теория планарного давления

Теория планарного давления была предложена Запфе и Симс [4]. Эта теория связывала растрескивание с образованием пузырьков водорода в микроструктуре, основанном на диффузии атомарного водорода к дефектным участкам, таким как границы зерен и границы раздела. Как только водород накапливается в этих местах, он объединяется с образованием пузырьков молекулярного водорода ( $H_2$ ) с высоким внутренним давлением. Если это давление превышает упругую прочность (предел текучести) материала, эти внутренние пустоты могут расти и связываться друг с другом. В конце концов сцепление этих пустот приводит к образованию трещин с помощью пластичной деформации или механизма раскалывания. Наличие пустот на поверхности излома, которые можно было наблюдать с помощью оптического микроскопа, вероятно, побудило Запфе и Симс предложить внутреннее давление в качестве движущей силы водородного растрескивания. С появлением электронной микроскопии и изучением стадии образования ВИР с высоким разрешением эта теория была оставлена. Хотя теория планарного давления и неприменима к ВИР, она может объяснить явление, известное как «пузырьки водорода», когда длительное воздействие водорода (или окружающей среды, которая генерирует водород) может привести к декогезии поверхности, проявляющейся в виде пузырьков.

#### Теория поверхностной адсорбции

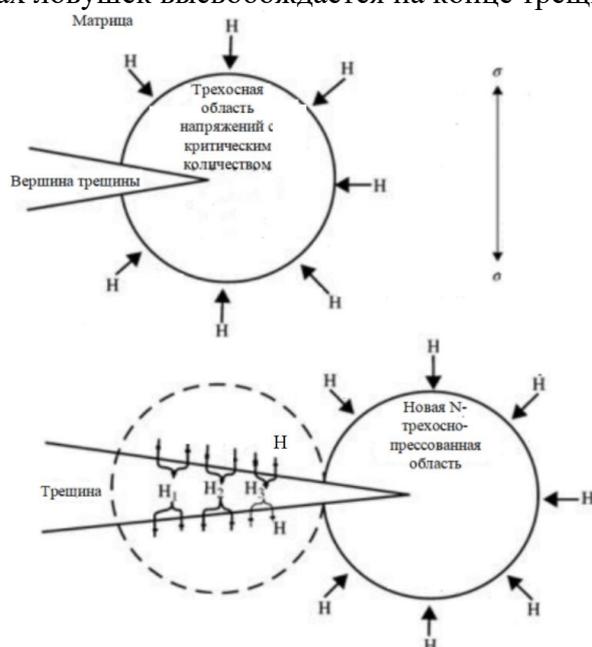
Теория поверхностной адсорбции была предложена Петчем [5, 6]. Было высказано предположение, что свободная энергия поверхности атомарно чистого металла снижается за счет водорода, адсорбированного на внутренней поверхности трещины. Разрушающее напряжение затем уменьшается на квадратный корень поверхностной энергии, согласно термодинамическому критерию Гриффита. В этих условиях трещины могут распространяться при низком приложенном напряжении. Теория поверхностной адсорбции имеет хорошую экспериментальную поддержку, но никогда не было удовлетворительного объяснения механики поведения водорода на атомистическом уровне в вершине трещины.

#### Теория декогезии

В теории декогезии от Трояно [7] предположено, что высокие трехосные напряжения, которые присутствуют при концентрации напряжений, таких как на кончике трещины, притягивают растворенный атомарный водород и локально снижают когезионную прочность. При достижении критической концентрации водорода образуется небольшая трещина, которая распространяется в область с высокой концентрацией водорода. Для дальнейшего роста трещины необходимо дождаться локального увеличения концентрации водорода перед трещиной. Этот процесс зарождения и распространения трещины повторяется до тех пор, пока не будет достигнут критический уровень водорода или уровень трехосного напряжения не уменьшится. Этот процесс схематически показан на рисунке 4.

Теория декогезии была также поддержана Ориани [8–10]. Он предположил, что максимальная сила сцепления между атомами уменьшается за счет растворенного водорода, который накапливается в местах ловушек, таких как пустоты, границы зерен и границы раздела. Если локальное напряжение превышает силу сцепления,

которая уменьшается растворенным водородом, атомные связи могут быть разорваны, и может произойти растрескивание. Влияние мест нахождения ловушек на водородное охрупчивание предполагает, что водород может накапливаться в определенных местах в микроструктуре, и «прочность» места ловушек определяет, при каких условиях водород может участвовать в процессе [11, 12]. Например, граница раздела между определенными выделениями и матрицей может представлять собой очень сильные ловушки, препятствующие выходу водорода в матрицу. В работе Сэвэджа и соавт. [13] использовали теорию декогезии, чтобы объяснить прерывистое выделение пузырьков водорода на кончике трещины, которые они наблюдали во время мониторинга. Предположительно, по мере распространения трещины водород в местах ловушек высвобождается на конце трещины.



**Рисунок 4.** Схематическая иллюстрация теории декогезии, предложенная Трояно [7]

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Kou S. *Welding Metallurgy*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience; 2003. стр. 411.
2. Lesnewich A. Influence of welding on steel weldment proquency. In: *ASM Handbook, Vol.6*. Materials Park, OH: ASM International; 1993, стр. 408-415.
3. Coe FR. *Welding Steels without Hydrogen Cracking*. Cambridge, UK: Welding Institute; 1973.
4. Zapffe C, Sims C. Hydrogen ehbrittlement, internal stress and defects in steel. *Trans AIME* 1941;145:225-271.
5. Petch NJ, Stables P. Delayed destruction of metals under static load. *Nature* 1952;169:842-843.
6. Petch NJ. Снижение напряжения разрушения за счет поверхностной адсорбции. *Philos Mag* 1956;1:331-337.
7. Troiano AR. Роль водорода и других интерстициалов в механическом поведении металлов. *Trans ASM* 1960;52:54-80.

8. Oriani R, Josephic P. Равновесные аспекты водородного растрескивания сталей. Acta Metall 1974;22:1065-1074.
9. Oriani R, Josephic P. Равновесные и кинетические исследования водородного растрескивания стали. Acta Metall 1977;25:979-988.
10. Oriani R. Водородное охрупчивание сталей. Ann Rev Mater Sci 1978;8:327-357.
11. Pressouyre G, Bernstein IM. Кинетическая модель захвата для водородного растрескивания. Acta Metall 1979;27:89-100.
12. Pressouyre G. Теория ловушек водородного охрупчивания. Acta Metall 1980;28:895-911.
13. Savage WF, Nippes EF, Szekeres ES. Водородное холодное растрескивание в низколегированной стали. Weld J 1976;55 (9):276s-283s.