

## ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВОДОРОДНОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19720719>

Садуллаева Зарифа Шариповича  
*Olmaliq davlat texnika instituti (O'zbekiston)*

Водородное растрескивание (ВР) является одной из наиболее серьёзных проблем при сварке сталей, особенно высокопрочных. Оно может возникать как в металле сварного шва, так и в зоне термического влияния (ЗТВ), однако на практике чаще наблюдается именно в ЗТВ. Это объясняется сочетанием неблагоприятной микроструктуры и высоких растягивающих напряжений в данной области.

Для возникновения водородного растрескивания необходимо одновременное выполнение нескольких условий: наличие достаточного количества водорода, формирование чувствительной микроструктуры, присутствие значительных напряжений и температура, близкая к окружающей среде. Контроль этих факторов является ключом к предотвращению дефектов сварных соединений.

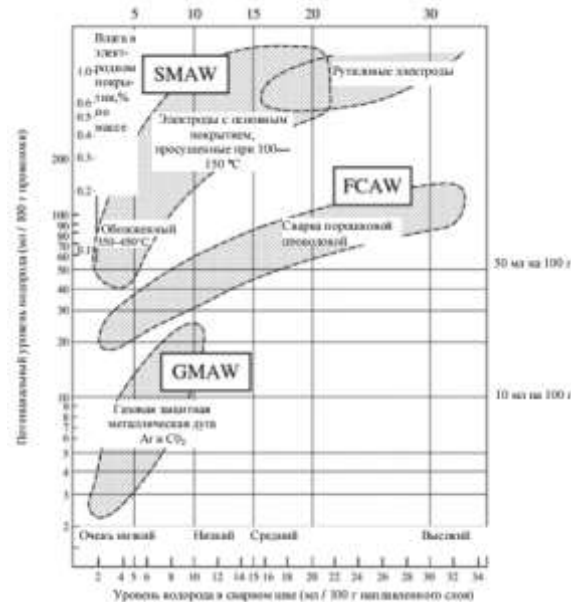
### **1. Роль водорода в сварных соединениях**

Водород может попадать в сварной шов из различных источников. К ним относятся исходный материал, влага в электродных покрытиях и флюсах, загрязнения поверхности (масла, смазки), защитные газы, а также атмосферная влага. В расплавленном металле растворимость водорода значительно выше, чем в твёрдом состоянии, поэтому во время сварки он активно поглощается сварочной ванной. После кристаллизации водород начинает диффундировать, преимущественно в сторону зоны термического влияния.

Следует различать общее содержание водорода и его диффундирующую часть. Именно диффундирующий водород представляет наибольшую опасность, поскольку способен перемещаться к зонам концентрации напряжений и инициировать трещины. Часть водорода может быть «захвачена» дефектами кристаллической структуры (границами зерен, включениями), что ограничивает его подвижность.

Определение содержания водорода представляет собой сложную задачу из-за его высокой подвижности. Существуют различные методы измерения, включая метод вытеснения ртути и газовую хроматографию. Первый основан

на измерении объёма выделившегося водорода, однако в настоящее время используется реже из-за экологических ограничений. Более современный подход — применение газовых хроматографов, позволяющих быстро и точно определять содержание водорода.



**Рисунок 1** Влияние процесса сварки на содержание водорода (из [3], © Elsevier)

Уровень водорода в сварном шве обычно выражается в мл на 100 г металла. Значения ниже 10 мл/100 г считаются безопасными, диапазон 10–20 требует дополнительных мер предосторожности, а превышение 20 мл/100 г значительно увеличивает риск растрескивания.

Технология сварки существенно влияет на количество вводимого водорода. Процессы с использованием флюсов более склонны к его накоплению из-за присутствия влаги, тогда как сварка в защитных газах обеспечивает более низкие уровни водорода.

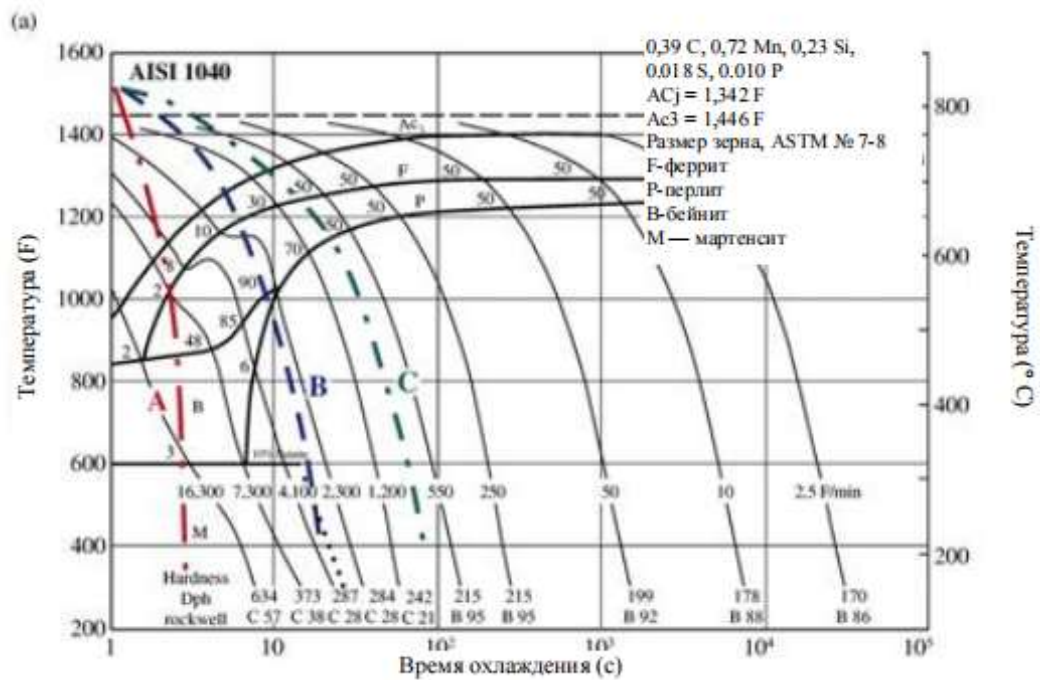
## 2. Влияние микроструктуры

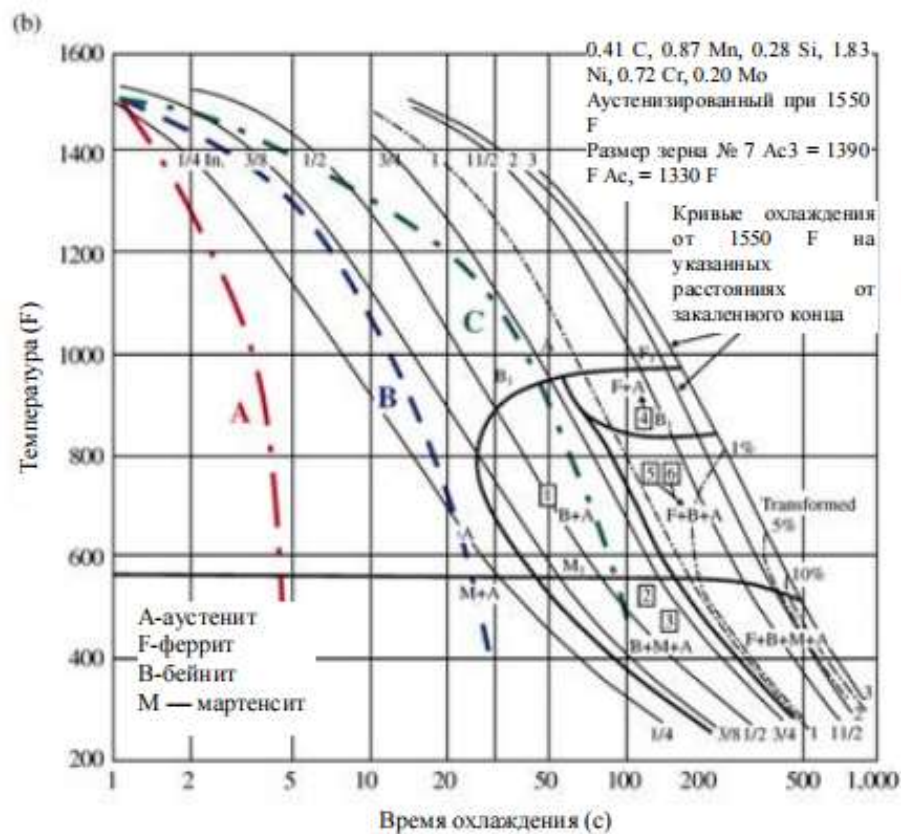
Микроструктура стали является одним из ключевых факторов, определяющих её чувствительность к водородному растрескиванию. Наиболее опасными считаются твёрдые и хрупкие структуры, такие как мартенсит и бейнит, которые образуются при высоких скоростях охлаждения.

Скорость охлаждения зависит от параметров сварки, температуры предварительного подогрева, толщины материала и других факторов. Важным параметром является время охлаждения в диапазоне температур от 800 до 500 °C ( $t_8/5$ ), так как именно в этом интервале происходят основные фазовые превращения.

Различные стали демонстрируют разную склонность к образованию опасных структур. Например, сталь с низкой прокаливаемостью формирует преимущественно ферритно-перлитную структуру при умеренных скоростях охлаждения, что снижает риск растрескивания. В то же время высокопрочные легированные стали склонны к образованию мартенсита даже при относительно медленном охлаждении.

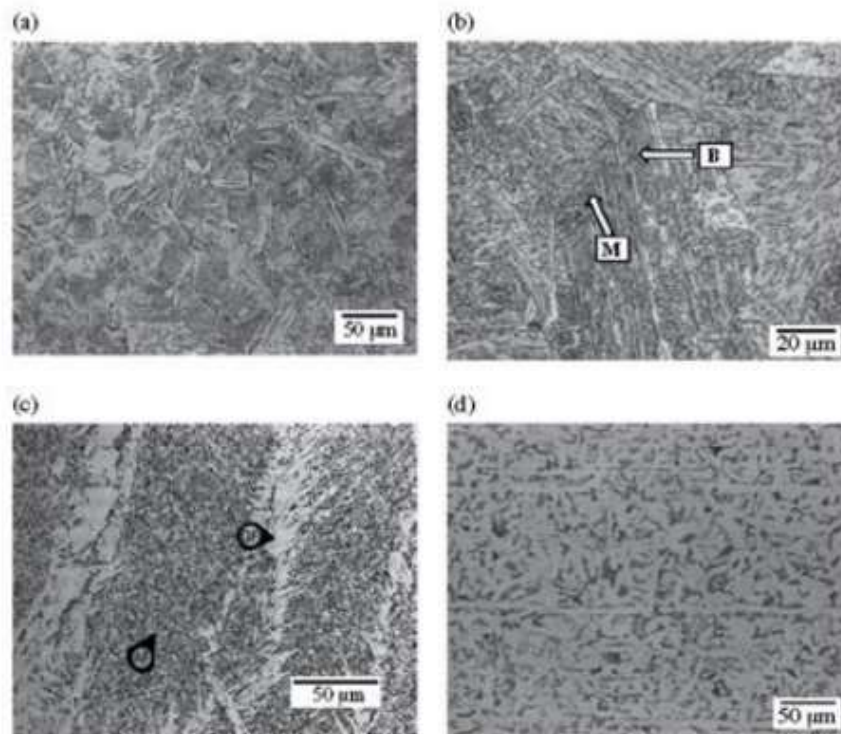
Твёрдость также служит косвенным показателем склонности к растрескиванию. Обычно структуры с твёрдостью ниже 35 HRC считаются относительно устойчивыми. При этом содержание углерода играет решающую роль, поскольку именно оно определяет твёрдость мартенсита.





**Рисунок 2.** Диаграммы превращения при непрерывном охлаждении. (а) AISI 1040 и (b) AISI 4340 (источник [4] ). © ASM)

Для оценки свариваемости и склонности к растрескиванию широко используются формулы углеродного эквивалента (CE). Чем выше значение CE, тем выше вероятность образования твёрдых структур и, соответственно, водородного растрескивания. Однако универсальной формулы не существует – выбор зависит от состава стали.

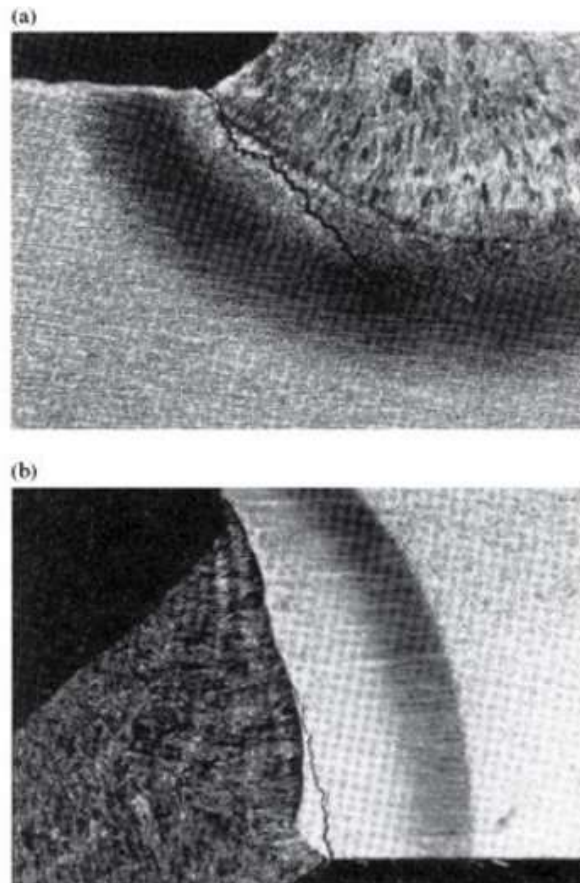


**Рисунок 3.** Типы микроструктуры в стали. (a) Мартенсит, (b) бейнит/мартенсит, (c) игольчатый феррит с зернограницным ферритом и (d) феррит и перлит.

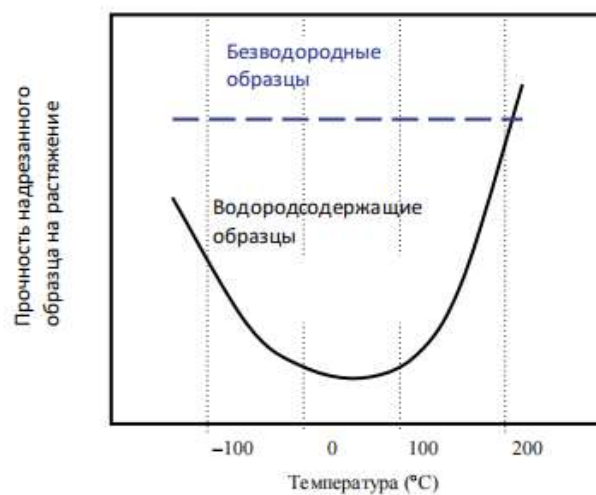
### 3. Влияние напряжений

Наличие растягивающих напряжений является обязательным условием возникновения водородного растрескивания. Эти напряжения могут быть как остаточными (возникающими в процессе сварки), так и внешними.

Особую опасность представляют локальные концентрации напряжений, возникающие в геометрически несовершенных участках: подрезах, непроварах, шлаковых включениях и других дефектах. В таких зонах водород накапливается наиболее интенсивно, что увеличивает вероятность образования трещин.



**Рисунок 4.** Примеры водородного растрескивания, возникающего в точках концентрации напряжений (источник [6] . © Maney)



**Рисунок 5.** Влияние водорода на прочность надрезанного образца на растяжение в водороде (согласно источнику [6] ).

Остаточные напряжения в сварных соединениях могут достигать значений, близких к пределу текучести материала. При наличии

концентраций напряжений даже небольшое количество водорода может привести к разрушению.

Контроль напряжений является сложной задачей, так как они зависят от множества факторов: толщины материала, конструкции соединения, условий закрепления и режима сварки.

#### **4. Температурный фактор**

Температура оказывает значительное влияние на процессы водородного растрескивания. При повышенных температурах (выше 200 °С) водород легко диффундирует и покидает металл, а вязкость разрушения увеличивается, что снижает риск образования трещин.

При очень низких температурах подвижность водорода уменьшается, однако одновременно снижается и пластичность материала, что может маскировать или усиливать эффект растрескивания.

Особое значение имеет диапазон температур, близких к комнатной, при которых сочетаются достаточная подвижность водорода и высокая чувствительность микроструктуры. Именно в этих условиях чаще всего наблюдается водородное растрескивание.

Важно учитывать, что только диффундирующий водород участвует в процессе разрушения. Водород, находящийся в «захваченном» состоянии, не способен перемещаться и, как правило, не оказывает существенного влияния.

#### **Заключение**

Водородное растрескивание является результатом сложного взаимодействия нескольких факторов: содержания водорода, микроструктуры, напряжённого состояния и температуры. Для предотвращения данного дефекта необходимо комплексное управление всеми этими параметрами.

Основные меры включают снижение содержания водорода, контроль теплового режима сварки, предотвращение образования твёрдых структур и минимизацию концентраций напряжений. Только системный подход позволяет обеспечить надёжность и долговечность сварных конструкций.

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Pressouyre G. Trap theory of hydrogen embrittlement. Acta Metall 1980;28:895-911.
2. Fazilov D. S., Mamatqulov R. S. o'g'li, Kenjayev, TN o'gli, & Abdukaхharov, AA o'g'li.(2024). Boyitish fabrikalari jihozlarining yeyilish sabablari //Science and Education. – Т. 5. – №. 4. – С. 146-151.

3. Bailey N, Coe FR, Gooch TG, Hart PHM, Jenkins N, Pargeter RJ. Welding Steels without Hydrogen Cracking. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited; 1993.

4. American Society for Metals. Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams. Metals Park, OH: ASM International; 1977.

5. Fazilov D. S., Mamatqulov R. S. o'g'li, Kenjayev, TN o'gli, & Abdukaxxarov, AA o'g'li.(2024). Boyitish fabrikalari jihozlarining yeyilish sabablari //Science and Education. – T. 5. – №. 4. – C. 146-151.

6. Threadgill PL. Avoiding HAZ defects in welded structures. Metals Mater 1985; July :422-429.

7. Ergashev M. et al. Yeyilgan detallarni qayta tiklash va mustahkamlash texnologiyalarining samaradorligini taqqoslash //Science and Education. – 2023. – T. 4. – №. 2. – C. 773-778.

8. Kenjayev T. N., Mamatkulov R. S., Abdukaxxarov A. A. ZANGLAMAYDIGAN PO 'LAT QUVURLARNI KOMBINATSYALASHGAN LAZER VA YOYLI PAYVANDLASH //InnoRes. – 2025. – T. 1. – №. 5. – C. 25-39.

9. Кенжаев Т. Н. У. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СВАРКЕ //Central Asian Journal of Multidisciplinary Research and Management Studies. – 2024. – T. 1. – №. 16. – C. 138-142.