

О ВЛИЯНИИ ЛОКАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ ЗЕРЕН НА ПУТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИН КВАЗИ-СКОЛА В НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ, ОХРУПЧЕННОЙ ВОДОРОДОМ

Мерсон Е.Д.¹, Мягких П.Н.¹, Полуянов В.А.¹, Мерсон Д.Л.¹, Виноградов А.Ю.²

1 – НИИ прогрессивных технологий, ТГУ, г. Тольятти, Россия,

2 – Норвежский технологический университет, г. Тронхейм, Норвегия

Mersoned@gmail.com

1. Введение

Вопрос о природе водородной хрупкости (ВХ) сталей, а также других металлов и сплавов остается открытым на протяжении многих десятков лет. В частности, ведутся дискуссии относительно механизма роста трещин в наводороженных низкоуглеродистых сталях, который приводит к формированию поверхности разрушения с морфологией квази-скола (КС). Помимо относительно плоских террас на поверхности такого типа присутствует большое количество элементов, характерных для вязкого разрушения, таких как: гребни отрыва, полосы и ступеньки скольжения и т.д. [1,2] Данная особенность, а также ряд других экспериментальных фактов, описанных в других работах [3], натолкнула ряд исследователей на мысль о том, что в микромасштабе механизм роста трещин КС имеет вязкую природу, т.е. сопровождается образованием и слиянием микро- или нано-пор [4]. В то же время существует противоположная точка зрения, согласно которой водород тем или иным способом облегчает рост трещин по классическому механизму скола, а элементы вязкого разрушения в изломе являются следствием сопутствующих процессов пластической деформации [5]. Следует, однако, отметить, что рост трещин скола в масштабе одного зерна должен осуществляться вдоль строго определенных кристаллографических плоскостей, тогда как путь вязких трещин в том же масштабе должен скорее определяться полем напряжений и в меньшей степени зависеть от микроструктуры и кристаллографии зерен. Таким образом, целью настоящей работы было установить влияние локальных полей напряжений и кристаллографической ориентации зерен феррита на путь распространения трещин квази-скола в наводороженной низкоуглеродистой стали.

2. Материалы и методика исследования.

При помощи электроискрового станка из горячекатаного листа промышленной низкоуглеродистой стали марки S235JR вдоль направления прокатки были вырезаны прямоугольные плоские образцы в виде пластин размером 60×11×2 мм с центральным сквозным надрезом. Образцы шлифовали, отжигали в вакууме при 950 С° в течение 30 мин для получения крупнозернистой феррито-перлитной структуры и затем полировали при помощи 1 мкм суспензии с финальной электрополировкой поверхности в области надреза.

Механические испытания проводили при скорости деформирования 0,1 мм/мин по схеме одноосного растяжения при помощи универсальной разрывной машины H50KT (Tinius Olsen). Электролитическое наводороживание образца проводили непосредственно в процессе испытания при плотности тока 5 мА/см². Для этого на образце, являющемся катодом, была закреплена емкость, заполненная электролитом состава 5% H₂SO₄ + 1,5 г/л тиомочевины, так что электролит полностью покрывал область надреза. На внутренних стенках ячейки была закреплена платиновая проволока, служащая анодом. Электролит заливали в ячейку непосредственно перед началом испытания, которое запускали одновременно с электролизом.

Излом и боковую поверхность образца после разрушения исследовали при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) SIGMA (Zeiss), оснащенным оборудованием и программным обеспечением для анализа картин дифракции обратноотраженных электронов (EBSD).

3. Результаты.

Фрактографический анализ показал, что вся поверхность разрушения образца имеет морфологию КС (рис. 1а), без каких-либо следов обычного вязкого ямочного рельефа, который характерен для данной стали при тех же условиях испытания, но без наводороживания. При этом особенности КС в данном случае были такими же, как у КС, наблюдаемого на поверхности дефектов типа «рыбий глаз» в изломе этой же стали, но испытанной после предварительного наводороживания [2].

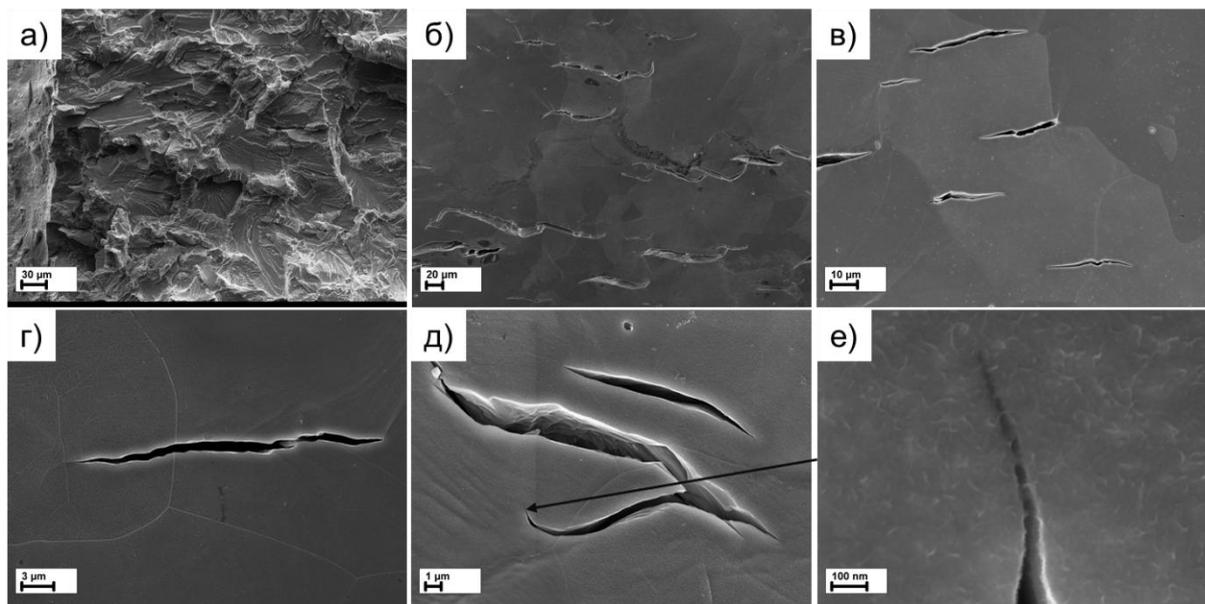


Рисунок 1 – Особенности излома – а) и боковой поверхности – б-е) образца низкоуглеродистой стали, испытанного в процессе наводороживания: а) – фрагмент поверхности разрушения вблизи надреза, б) – искривленные трещины вблизи излома, в) – условно прямые трещины вдали от излома, г) – прямая трещина пересекающая границу зерна, д) – трещины пересекающие границы зерен и изгибающиеся внутри зерна, е) – нанометровые поры в устье одной из трещин, указанной стрелкой

На боковой поверхности образцов в области пластической зоны под изломом наблюдается множество вторичных острых транскристаллитных трещин (рис. 1б-е). При этом за пределами пластической зоны трещины отсутствуют. Трещины, расположенные близко друг к другу, как правило, имеют примерно одинаковую ориентацию относительно оси растяжения (рис. 1б, в). Важно отметить, что те трещины, которые располагаются относительно близко к излому или надрезу чаще всего имеют сильно искривленную форму даже в пределах одного зерна (рис. 1б). В то время как в периферийной части пластической зоны, т.е. вдали от излома и надреза, трещины в большинстве случаев относительно прямые, даже если располагаются близко друг к другу (рис. 1в). Отсюда следует, что поле напряжений от надреза и главной трещины оказывает сильное влияние на форму и путь вторичных трещин.

На рис. 1г, д можно заметить, что трещины могут пересекать границы зерен без заметного изменения направления роста. В то же время в некоторых случаях они плавно изгибаются внутри зерна, формируя волнистый рельеф поверхности разрушения (рис. 1д). Ранее в работе [2] при помощи конфокальной лазерной сканирующей микроскопии похожий профиль рельефа поверхности был обнаружен у некоторых фасеток КС в этой же стали предварительно насыщенной водородом. При помощи метода EBSD установлено, что зерна, в которых наблюдаются плавно искривленные трещины, имеют равномерную кристаллографическую ориентацию. Следовательно, искривление трещин не связано с локальным изменением кристаллографической ориентации зерна. Это означает, что путь распространения данных трещин не привязан жестко к каким-либо кристаллографическим плоскостям, в

отличие от трещин скола, которые в ОЦК железе и сталях растут вдоль плоскостей семейства {001}.

Хотя на первый взгляд рассматриваемые трещины имеют чисто хрупкую внешность, в устьях многих из них обнаружены поры размером порядка от 10-200 нм (рис. 1е). Данные поры образуются в очень тонкой мембранной стенке между внешней поверхностью образца и внутренним объемом трещины. Таким образом, можно заключить, что пластическая деформация и процессы образования и слияния нано-пор являются неотъемлемой частью механизма роста трещин КС в наводороженной низкоуглеродистой стали.

4. Выводы

1. Показано, что основным фактором определяющим путь распространения трещин квази-скола, в том числе, в масштабе одного зерна феррита наводороженной низкоуглеродистой стали являются локальные поля напряжений, в то время как влияние микроструктуры и кристаллографической ориентации зерен имеет второстепенное значение.

2. В устьях трещин квази-скола в наводороженной низкоуглеродистой стали обнаружены поры нано-размера, зарождение и слияние которых, по всей видимости, является неотъемлемой частью механизма роста данных трещин.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 17-08-01033)

Использованные источники:

1. Merson E.D. et al. Effect of fracture mode on acoustic emission behavior in the hydrogen embrittled low-alloy steel // Eng. Fract. Mech. 2018.
2. Merson E. et al. Quantitative characterization of cleavage and hydrogen-assisted quasi-cleavage fracture surfaces with the use of confocal laser scanning microscopy // Mater. Sci. Eng. A. 2016. Vol. 665. P. 35–46.
3. Lynch S.P. Hydrogen embrittlement phenomena and mechanisms // Corros. Rev. 2012. Vol. 30, № 3–4. P. 63–133.
4. Martin M.L. et al. On the formation and nature of quasi-cleavage fracture surfaces in hydrogen embrittled steels // Acta Mater. 2011. Vol. 59, № 4. P. 1601–1606.
5. Birenis D. et al. Interpretation of hydrogen-assisted fatigue crack propagation in BCC iron based on dislocation structure evolution around the crack wake // Acta Mater. 2018. Vol. 156. P. 245–253.