

ОСОБЕННОСТИ КВАЗИСКОЛА ПРИ ВОДОРОДНОЙ ХРУПКОСТИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Е. Д. Мерсон¹, В. А. Полюянов¹, П. Н. Мяких¹, Д. Л. Мерсон¹, А. Ю. Виноградов²

*1 - НИИ прогрессивных технологий, Тольяттинский государственный университет,
г. Тольятти, Россия*

*2 - Норвежский технологический университет, г. Тронхейм, Норвегия,
MersonED@gmail.com*

1. Введение

На протяжении десятков лет водородная хрупкость (ВХ) сталей является актуальной проблемой для нефтегазовой, химической и других отраслей промышленности. Несмотря на многолетнюю историю изучения, по-прежнему остается множество недостаточно изученных вопросов, касающихся природы данного явления. В частности, в последнее время в литературе активно обсуждается роль водорода в механизме формирования изломов с морфологией квазискола, называемой также сколоподобной или квази-хрупкой [1, 2]. В соответствии с представлениями М. А. Штремеля [3], формирование рельефа излома, называемого «квазисколом» есть следствие развития трещин по механизму скола в структуре с высокой плотностью дислокаций. Из-за того, что кристаллографические плоскости скола в такой структуре развернуты на большой угол плоские фасетки в ней образоваться не могут. Недавно с помощью конфокальной лазерной сканирующей микроскопии (КЛСМ) в работе [4] было показано, что фасетки квазискола в наводороженной низкоуглеродистой стали имеют криволинейный профиль, в отличие от плоских фасеток скола в изломе той же стали, разрушенной в жидком азоте. Поскольку наводороженные образцы перед разрушением в данном исследовании претерпевали большую деформацию, чем те, что были испытаны в жидком азоте, действительно, опираясь на рассуждения Штремеля, можно предположить, что искривленные фасетки квазискола в наводороженной стали – это фасетки скола в деформированном зерне феррита. Однако существует устойчивое мнение о том, что механизм образования рельефа квазискола в случае ВХ не имеет отношения к разрушению сколом и скорее имеет больше общего с вязким разрушением [1, 2]. Вследствие противоречивости данных по рассматриваемому вопросу, целью настоящего исследования было: установить является ли скол в структуре с высокой плотностью дислокаций механизмом формирования фасеток квазискола на поверхности дефектов «рыбий глаз» в наводороженной низкоуглеродистой ферритной стали.

2. Методика исследования

Для достижения поставленной цели в работе проводили эксперимент по следующей методике. Плоский гладкий образец для испытаний на одноосное растяжение с размером рабочей части 15x4x2,5 мм при помощи электроискрового станка был вырезан из горячекатаного листа низкоуглеродистой стали марки S235JR и затем отожжен в вакууме при температуре 950 °С в течение 30 минут.

Насыщение образца водородом проводили электролитическим методом в 5% растворе H₂SO₄ с добавлением 1,5 г/л тиомочевины (стимулятор наводороживания) при плотности тока 400 мА/см² в течение 1 часа. Сразу после окончания наводороживания образец закрепляли в захватах универсальной испытательной машины H50KT (Tinius Olsen), на нижнем захвате которой была установлена емкость, предназначенная для заливки жидкого азота. При комнатной температуре производили растяжение образца до остаточной деформации 12% при постоянной скорости движения траверсы 5 мм/мин. Затем образец полностью разгружали, заливали в емкость жидкий азот, так что он полностью закрывал образец, и после прекращения кипения азота производили повторное нагружение образца до разрушения.

Фрактографическое исследование проводили при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) SIGMA (Zeiss) и КЛСМ Lext OLS4000 (Olympus).

3. Результаты и обсуждение

Результаты эксперимента показали, что разрушение образца при испытании в жидком азоте произошло в области квазиупругой деформации без какой-либо дополнительной пластической деформации.

Согласно результатам фрактографического анализа, в изломе образца присутствует несколько дефектов типа «рыбий глаз», представляющих собой округлые области поверхности разрушения с морфологией квазискола (рис. 1а). Хорошо известно, что появление данных дефектов в изломе является следствием наличия в стали диффузионно-подвижного водорода [5, 6]. Они зарождаются, преимущественно, на неметаллических включениях, которые служат концентраторами одновременно и напряжений, и водорода, создавая, таким образом, вблизи них наиболее благоприятные условия для зарождения трещин ВХ. Рост таких трещин начинается на стадии деформационного упрочнения [5] и происходит в радиальном направлении от очага, о чем свидетельствует ориентация линий речного узора на фасетках (рис. 1а). Очевидно, что дефекты «рыбий глаз» образовались в процессе первого нагружения при комнатной температуре, поскольку при температуре жидкого азота диффузионная подвижность водорода чрезвычайно мала и он не участвует в процессе роста трещин.

За пределами данных дефектов излом полностью состоит из фасеток скола (рис. 1). Причем наблюдается четкая граница между поверхностью дефекта «рыбий глаз» и поверхностью скола (рис. 1 б-г). Отличительной особенностью морфологии фасеток квазискола является наличие на их поверхности многочисленных гребней отрыва, а также полос, ориентированных приблизительно перпендикулярно линиям речного узора. С помощью КЛСМ установлено, что на границе раздела квазискол/скол имеется четкая граница перехода от плавно искривленного участка профиля, соответствующего фасеткам квазискола, к участку, представленному ломаной линией, который соответствует фасеткам скола (рис. 1г). Таким образом, поскольку в соответствии с условиями эксперимента деформация микроструктуры по сечению излома должна быть примерно одинаковой, она не могла стать причиной искривления фасеток квазискола. В противном случае, т.е. если бы криволинейный профиль поверхности фасеток квазискола формировался в результате роста трещины скола в деформированной структуре, фасетки скола, образованные при нагружении образца в жидком азоте должны были бы иметь точно такой же рельеф, как и фасетки на поверхности «рыбьего глаза».

Если в соответствии с [3] считать, что «квазискол» – это поверхность разрушения, образованная в результате скола в сложной структуре (многофазной, мелкодисперсной, с высокой плотностью дислокаций и т.д.), то фасетки на поверхности дефектов «рыбий глаз» не вполне корректно называть фасетками квазискола, поскольку механизм их образования, по-видимому, имеет иную природу. Относительно последней, существует несколько альтернативных гипотез, в которых, так или иначе, подразумевается, что формирование поверхности квазискола в наводороженных сталях есть результат вязкого разрушения [1, 2]. Проверка данных гипотез выходит за рамки настоящей работы и требует дополнительных исследований.

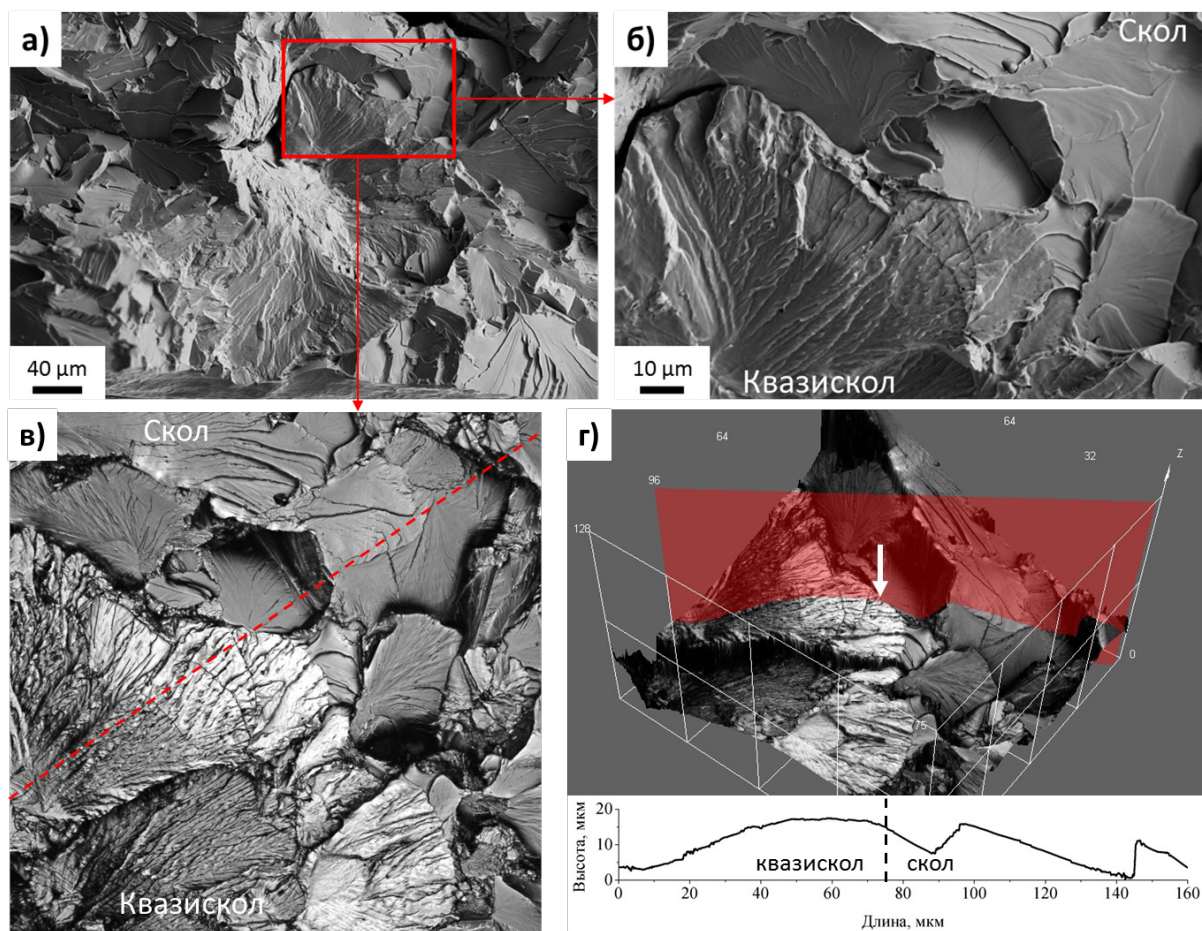


Рисунок 1 – Дефект типа «рыбий глаз» с морфологией квазискола в окружении фасеток скола на СЭМ (а, б) и КЛСМ (в, г) снимках поверхности разрушения наводороженного образца, продеформированного на воздухе до 12% остаточной деформации и затем разрушенного в жидком азоте.

4. Выводы.

Установлено, что формирование фасеток квазискола на поверхности дефектов «рыбий глаз» в наводороженной низкоуглеродистой стали происходит по механизму, отличному от механизма скола в структуре с высокой плотностью дислокаций.

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

Список использованных источников:

1. 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.
2. Lynch S. P. Hydrogen embrittlement phenomena and mechanisms // Corros. Rev. - 2012. -Vol.30, № 3-4. -P. 63–133
3. Штремель М.А. Разрушение Книга 2. М.: Изд. Дом МИСиС, 2015. -976 р.
4. 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. Elsevier. - 2016. -Vol. 665. -P. 35–46.
5. Merson E. Application of acoustic emission method for investigation of hydrogen embrittlement mechanism in the low-carbon steel // J. Alloys Compd.-2015. -Vol.645. -P. S460–S463.
6. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. М.: Наука, 2008. -334 р.