

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ АУСТЕНИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

А.С. ФОРТУНА

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Институт физики прочности и материаловедения
E-mail: anastasya_fortuna@mail.ru

В среде водорода многие металлы подвергаются охрупчиванию, что обусловлено его взаимодействием с дефектами кристаллической решетки. Коррозионностойкие аустенитные стали проявляют большую стойкость к водородному охрупчиванию, чем другие конструкционные материалы. При этом степень водородного охрупчивания в них в большой степени определяется механизмами их деформации, которые, в свою очередь, зависят от характера нагружения. Цель данной работы – выявить влияние скорости деформирования на процессы водородного охрупчивания, механические свойства и коэффициенты деформационного упрочнения аустенитной нержавеющей стали 01X17H14M3.

Исходные стальные заготовки (Cr 16,8%, Ni 13,3%, Mo 2,7%, Mn 1,7%, Si 0,6%, C 0,01%, Fe ост.) подвергали закалке в воду ($T=1100^{\circ}\text{C}$, 1ч.) для получения аустенитной структуры (средний размер зерна составлял 19 мкм). Наводороживание осуществляли в электролитической ячейке при комнатной температуре в течение 100 часов, при плотности тока 50 mA/cm^2 , в 1 N водном растворе H_2SO_4 с добавлением $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$. Образцы подвергали одноосному статическому растяжению до разрыва с относительными начальными скоростями деформации $6,2 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}$, $6,2 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ и $6,2 \times 10^{-3} \text{ c}^{-1}$. Изучение микромеханизмов разрушения стали (поверхностей излома) и боковых поверхностей разрушенных образцов производили методом растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Увеличение скорости деформирования сопровождается повышением пределов текучести $\sigma_{0,2}$ и прочности σ_B в исходных закаленных образцах стали, не насыщенных водородом, а также способствует снижению их пластичности – общего удлинения δ и однородной деформации ϵ , рисунок 1, таблица 1.

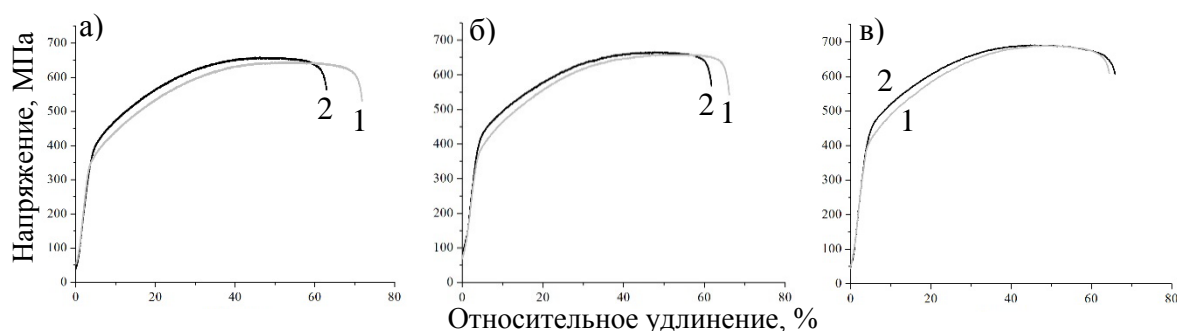


Рисунок 1 – Инженерные кривые течения образцов стали 01X17H14M3 в зависимости от скорости деформирования: а) $6,2 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}$, б) $6,2 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$, в) $6,2 \times 10^{-3} \text{ c}^{-1}$, 1 – исходные образцы, 2 – образцы, насыщенные водородом

Таблица 1 – Механические свойства образцов стали 01X17H14M3, подвергнутых растяжению при различных скоростях деформирования (в исходном состоянии / в наводороженном состоянии)

Скорость деформирования, c^{-1}	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ϵ , %	K_H , %
$6,2 \times 10^{-5}$	360/390	1050/1020	54/47	41/36	13
$6,2 \times 10^{-4}$	390/450	1050/1030	51/45	38/36	12
$6,2 \times 10^{-3}$	430/470	1080/1080	47/44	37/38	6

Наводороживание не изменяет стадийности пластического течения стали при всех исследуемых скоростях деформации, рисунок 1. Коэффициенты деформационного упрочнения при наводороживании изменяются слабо. Насыщение водородом вызывает рост пределов текучести и снижение пределов прочности, таблица 1. Пластичность стальных образцов при наводороживании снижается, однако этот эффект уменьшается при повышении скорости деформации. В результате этого, разница пределов прочности и общего удлинения исходных и насыщенных водородом образцов тем меньше, чем выше скорость деформирования. Для исходных и насыщенных водородом образцов не выполняется условие Консидера, то есть образование шейки на образцах происходит при значениях напряжения больших, чем значение коэффициента деформационного упрочнения $d\sigma/d\varepsilon < \sigma$, что свойственно материалам с планарной дислокационной структурой, в которых образование шейки затруднено за счёт подавления множественности сдвига.

По полученным результатам механических испытаний образцов, таблица 1, рассчитали коэффициент водородного охрупчивания K_H , характеризующий относительное изменение общего удлинения образцов стали при наводороживании. При повышении скорости деформирования коэффициент водородного охрупчивания уменьшается (таблица 1), то есть сталь проявляет меньшие эффекты водородного охрупчивания.

При всех исследуемых скоростях деформации ненаводороженные образцы стали разрушаются транскристаллитно вязко с образованием шейки. На поверхностях излома, изученных методом РЭМ, наблюдается большое количество ямок. С увеличением скорости деформации размер ямок уменьшается. В наводороженных образцах центральная часть образца разрушается вязко, по аналогии с исходными ненаводороженными образцами. Однако в результате насыщения водородом в них формируется тонкий поверхностный слой толщиной порядка 17 мкм, который разрушается хрупко при растяжении. Толщина такого слоя не зависит от скорости деформации и определяется, прежде всего, продолжительностью и условиями наводороживания образцов. Согласно данным РЭМ-анализа поверхностей излома наводороженных образцов, такие поверхностные слои разрушаются по механизму квазискола и скорость деформации не влияет на микромеханизм их излома. Между этими двумя слоями образуется промежуточный слой – на поверхностях разрушения наблюдаются плоские фасетки со следами деформации. Ближе к поверхности в промежуточном слое видны следы деформации, вблизи центральной части образца в нем появляются ямки, форма которых вытянутая, а не равноосная, как в сердцевине. Формирование вытянутых ямок излома наиболее выражено при меньшей скорости деформирования и свидетельствует о процессах микролокализации деформации при растяжении образцов.

Исследования боковых поверхностей растянутых без наводороживания образцов показывают, что при всех скоростях деформирования внутри зёрен наблюдаются следы как одиночного, так и множественного сдвига. Вблизи шейки в таких образцах формируются полосы локализованной деформации. Повышение скорости деформирования вызывает огрубление следов деформации, наблюдаемые вблизи шейки полосы локализованной деформации приобретают макроскопический характер, что свидетельствует об усилении вклада механического двойникования и микролокализации сдвига. При деформации наводороженной стали происходит растрескивание боковых поверхностей образцов. Хрупкие трещины образуются на границах и в теле зерен, часто их направление совпадает со следами скольжения (двойникования). Это свидетельствует о накоплении водорода, как по границам зерна, так и в кристаллической решетке. Доля транскристаллитных трещин возрастает с увеличением скорости деформирования и при насыщении образцов водородом.

Автор работы выражает благодарность Е.Г. Астафуровой, Е.В. Мельникову, С.В. Астафурову, В.А. Москвиной, Г.Г. Майер и А.Г. Бурлаченко за помощь в проведении исследований. Исследования проведены с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» (ИФПМ СО РАН).