

ДИНАМИЧЕСКИЙ ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ И ОТКОЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ СТАЛЕЙ ЭИ659, ЭИ787-ВД И 30ХГСА В ИСХОДНОМ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАВОДОРОЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

*В. А. Огородников, А. А. Юхимчук, М. А. Мочалов, А. В. Андраманов,
А. Ю. Баурин, А. О. Бликов, И. Е. Бойцов, С. В. Ерунов,
И. П. Максимкин, И. Л. Малков, А. С. Пупков, Е. В. Шевнин*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Нижегородская обл.

Приведены результаты экспериментов по исследованию влияния водорода на прочность и пластичность сталей марок 30ХГСА, ЭИ659 в условиях квазистатических и ударно-волновых испытаний. Чувствительность выбранных марок стали к наводороживанию определяли по результатам испытаний: образцов в исходном состоянии и образцов, предварительно наводороженных при температуре 773 К и давлении в водороде 50 МПа в течение 24 часов. Испытания образцов проводили в среде воздуха при нормальном давлении или в среде водорода при давлении 25 МПа. Установлено, что сталь ЭИ659, легированная вольфрамом и ванадием, менее чувствительна к воздействию водорода, чем сталь 30ХГСА, легированная марганцем и хромом.

Введение

Известно, что в системах «металл-водородосодержащая среда» могут происходить различные физико-химические процессы, например, химическое взаимодействие водорода и металла с образованием новой гидридной фазы и газообразных продуктов, растворение водорода в кристаллической решетке, адсорбция, хемосорбция водорода и т. п. [1–6]. Причем, повышение температуры или давления водорода в такой системе увеличивает скорость этих процессов, а повышение скорости деформации приводит к их замедлению. Наводороживание металла способствует деградации его структуры, что может приводить к понижению пластичности и прочности. Механизмы влияния водорода на процессы разрушения даже таких наиболее исследованных сплавов, как стали, изучены недостаточно. В ряде практически важных случаев, например в кумулирующих системах перспективных энергетических устройств [7, 8], водородосодержащая газовая среда первоначально находится в оболочке из стали при высоких начальных статических давлениях от 20 до 100 МПа. При сжатии оболочки с газом, например с помощью продуктов взрыва, по ней первоначально проходит ударная волна. После ее выхода на внутреннюю границу оболочки в результате взаимодействия падающей и отраженной волн разгрузки в материале оболочки возникают растягивающие напряжения, которые могут привести к высокоскоростному разрушению материала оболочки (расслоению или отколу) [9]. Имеющиеся малые начальные возмущения оболочки

могут привести к потере устойчивости схождения тонкого откольного слоя и заметному снижению эффективности сжатия газа. В настоящее время в литературе отсутствуют экспериментальные данные по влиянию наводороживания на сдвиговую и откольную прочности сталей, необходимые для построения определяющих соотношений, описывающих их сопротивление высокоскоростному сжатию и растяжению. Приводимые в настоящей работе результаты экспериментальных исследований квазистатического и высокоскоростного ударно-волнового деформирования и разрушения стали в исходном и наводороженном состояниях призваны частично восполнить этот пробел. Для исследования использовали водородостойкую сталь ЭИ659 и сталь 30ХГСА, не относящуюся к этому классу.

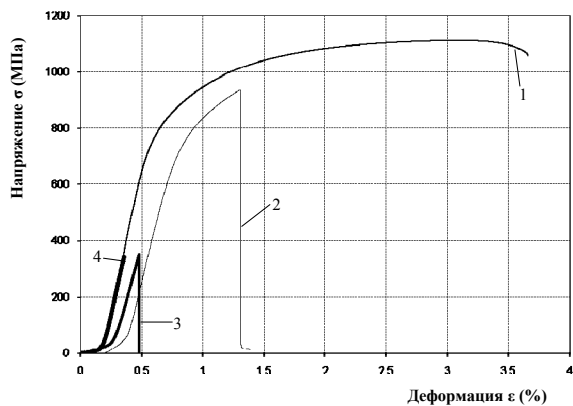
Поведение сталей 30ХГСА и ЭИ659 при квазистатических испытаниях

Исследования проводили на стандартных образцах с диаметром рабочей части 3 мм, выполненных по ГОСТ 1497-84. Влияние водорода на механические свойства сталей оценивали по результатам четырех типов испытаний образцов на растяжение: образцов без наводороживания на воздухе (тип I); наводороженных образцов на воздухе (тип II); образцов без наводороживания в среде водорода (тип III); наводороженных образцов в среде водорода (тип IV).

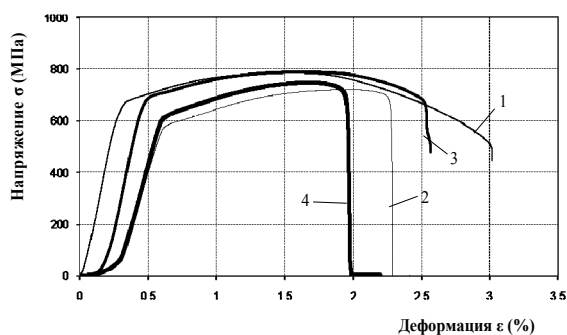
Наводороживание образцов проводили путем их выдержки в течение 24 часов в водороде при давлении 50 МПа и температуре 773 К. Для образцов из стали 30ХГСА в исходном и наводороженном состояниях концентрация водорода составила величины 2,3 и 25 ppm, а для образцов из стали ЭИ659 – 1,8 и 5,0 ppm соответственно.

Растяжение образцов проводили при температуре 293 К со скоростью деформации $4.5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ с использованием разрывной машины UTS 100К. При испытании образцов в среде водорода разрывная машина UTS 100К была доукомплектована специальными устройствами – испытательной камерой и газовакуумным оборудованием. Подробное описание процессов наводороживания сталей, процедуры определения концентрации водорода в образцах при помощи анализатора ELTRA OH900, методики испытаний на растяжение в среде водорода и построения диаграмм «напряжение – деформация» (σ - ε) приведено в [6]. Испытания образцов в среде водорода проводили при давлении водорода 25 МПа после их выдержки при этом давлении в течение одного часа.

Типичные диаграммы деформирования образцов при различных режимах испытаний приведены на рис. 1, а в табл. 1 представлены результаты определения следующих характеристик механических свойств: $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести, σ_b – временное сопротивление разрыву, δ – относительное удлинение при разрыве, ψ – относительное сужение.



а



б

Рис. 1. σ - ϵ диаграммы растяжения образцов из сталей 30ХГСА (а) и ЭИ659 (б).
1 – тип I; 2 – тип III; 3 – тип II; 4 – тип IV.

Таблица 1

Результаты испытаний на растяжение образцов из сталей 30ХГСА и ЭИ659

Материал	Тип испытаний образцов	Характеристики механических свойств			
		σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
		МПа		%	
Сталь 30ХГСА	I	1104	710	18,9	29,8
		1100	672	20,3	29,3
	III	935	-	-	-
		936	668	2,8	-
	II	345	-	≈ 0	≈ 0
		439	-	≈ 0	≈ 0
IV	353	-	≈ 0	≈ 0	
	308	-	≈ 0	≈ 0	
Сталь ЭИ659	I	763	646	14,2	64,7
		787	652	18,6	62,7
	III	731	588	14,5	24,4
		750	616	10,0	23,3
	II	758	653	14,3	43,2
		789	675	14,1	32,7
	IV	722	583	11,2	20,6
		777	670	9,6	22,4

Как видно из полученных результатов, сталь 30ХГСА обладает высокой чувствительностью к воздействию водорода. Выдержка образцов этой стали в водороде при давлении 50 МПа и температуре 773 К в течение 24 часов привела к полной потере их пластичности и разрушению на упругом участке нагружения при последующих испытаниях как на воздухе (тип II), так и в водороде (тип IV). Также наводороживание образцов вызвало снижение предела прочности до ~70 %. Воздействие внешнего водорода (испытания образцов типа III) на сталь 30ХГСА привело к ее сильному охрупчиванию, но не к полной потере пластичности, как при испытаниях образцов типа II и IV. Снижение σ_B у образцов из стали 30ХГСА в исходном состоянии, испытанных в среде водорода (тип III), составило ≈ 15 %.

В отличие от стали 30ХГСА сталь ЭИ659 оказалась более стойкой к воздействию водорода. Как видно из табл. 1, воздействие водорода (как внешнего – тип III, так и внутреннего – тип II) не оказало существенного влияния на прочностные характеристики стали ЭИ659 ($\sigma_{0.2}$ и σ_B), но привело к заметному снижению характеристик пластичности (δ и ψ). Причем, если сталь 30ХГСА показала большую чувствительность к воздействию внутреннего водорода (тип II), то сталь ЭИ659 наоборот сильнее охрупчивается при испытаниях образцов в среде водорода (тип III). Максимальное охрупчивание стали ЭИ659 наблюдается при совместном воздействии внутреннего и внешнего водорода (тип IV). Из таблицы 1 также видно, что наиболее чувствительной к водороду характеристикой этой стали является относительное сужение при разрыве. То есть вызванное водородом охрупчивание стали ЭИ659 происходит после локализации деформации (образования шейки) при растяжении образцов. При этом, несмотря на сильное водородное охрупчивание, характеристики пластичности стали ЭИ659 по величине остаются на достаточно высоком уровне: $\delta \geq 10$ % и $\psi \geq 20$ %.

На рис. 2 приведены фотографии микрошлифов поперечного сечения образцов исследуемых сталей до и после длительного наводороживания (тип I, II). Анализ металлографических исследований показывает, что в стали 30ХГСА после наводороживания происходит необратимое изменение структуры: сталь практически полностью обезуглеродилась и по границам зерен образовались микротрещины (рис. 2,б). При этом микротвердость стали 30ХГСА снизилась с 356 до 197 НВ. Причиной этого явления, называемого водородной коррозией, является взаимодействие водорода при повышенных давлениях и температурах с цементитом и рядом других карбидов, сопровождающееся образованием метана:

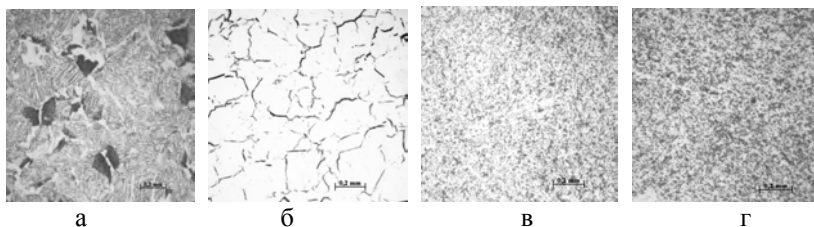
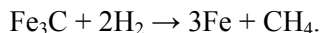


Рис. 2. Микроструктура сталей 30ХГСА (а, б) и ЭИ659 (в, г) до и после воздействия водорода соответственно

Молекулы метана, из-за больших размеров, не могут диффундировать в кристаллическую решетку и, скапливаясь на границах зерен, создают высокое давление, вызывающее растрескивание стали 30ХГСА.

Структура стали ЭИ659 после наводороживания в аналогичных условиях изменилась незначительно – наблюдается некоторая коагуляция карбидных фаз (рис. 2,г), обусловленная, по-видимому, длительным тепловым воздействием. Микротвердость стали ЭИ659 не изменилась: до и после наводороживания она равна 268 НВ. Значительно большая стойкость стали ЭИ659 к воздействию водорода по сравнению со сталью 30ХГСА обусловлена тем, что сталь ЭИ659 легирована более сильными карбидообразующими элементами (вольфрам, ванадий) по сравнению со сталью 30ХГСА (марганец, хром). В результате карбидные фазы стали ЭИ659 являются более водородоустойчивыми и граница обезуглероживания при наводороживании смещается в сторону более высоких температур, давлений и времен выдержки.

Поведение сталей 30ХГСА и ЭИ659 при ударно-волновых испытаниях

Для исследования влияния водорода на поведение прочностных характеристик сталей при ударно-волновом нагружении, использовали образцы в виде дисков диаметром 50 мм и высотой 5 мм, которые изготавливали из прутков сплавов ЭИ659 и 30ХГСА. Испытывали образцы без наводороживания на воздухе (тип I) и наводороженные образцы в описанных выше условиях (тип II) на воздухе.

Ударно-волновое нагружение исследуемых образцов проводили на установке БУТ-76 [10] с помощью ударников, изготовленных из этих же сталей, толщиной $\Delta_{уд} = \Delta_{обр}/2$ ($\Delta_{уд} = 2,5$ мм). Скорость ударника при подлете к образцу W_0 измеряли с точностью не хуже 0,5 %. В опытах с помощью лазерного интерферометра измеряли профиль скорости $W(t)$ свободной поверхности образца при выходе на нее ударной волны, который использовали для определения прочности образцов на динамическое сжатие (динамический предел текучести) и растяжение (откольная прочность) в исходном и наводороженном состоянии стали [11, 12]. Разрешающая способность по времени, достигнутая при использовании данного метода, составляет 2–3 нс, а относительная погрешность измерения скорости свободной поверхности методом лазерного интерферометра ± 3 % [13]. Характерные профили скорости свободной поверхности, полученные в результате ударно-волнового нагружения образцов, приведены на рис. 3.

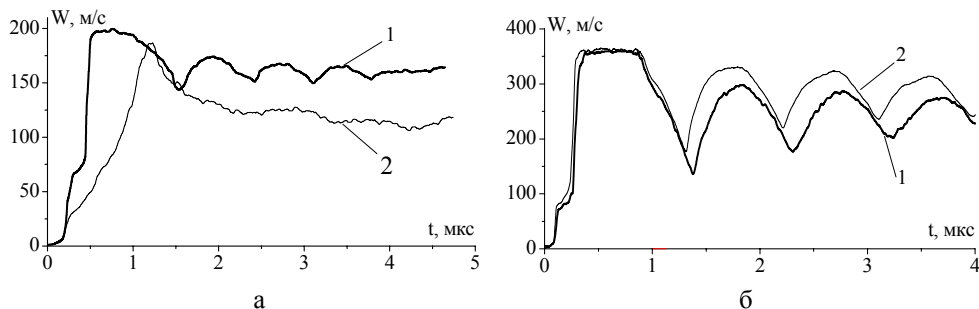


Рис. 3. Профили скорости свободной поверхности: а – сталь 30ХГСА, б – сталь ЭИ659, 1 – тип I, 2 – тип II.

Измеренный профиль скорости $W(t)$ использовали для оценки прочностных характеристик образцов на сжатие и растяжение: динамического предела текучести $Y = \frac{1-2\nu}{1-\nu} \sigma_y$, где $\sigma_y = 0,5\rho_0 c_0 W_{\text{упр}}$ предел текучести Гюгонио, оцениваемый по амплитуде упругого предвестника $W_{\text{упр}}$;

откольной прочности $\sigma_{\text{отк}} = 0,5\rho_0 c_0 (W_1 - W_2 + \delta W)$, где δW – упруго-пластическая поправка [12], ρ_0 – плотность, c_0 – скорость звука, W_1, W_2 – амплитуды скорости в первых максимуме и минимуме зависимости $W(t)$, ν – коэффициент Пуассона. Скорость деформации материала образца составляла $\dot{\epsilon} \approx \frac{W}{2\Delta_{y\delta}} = 5 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$. Условия нагру-

жения образцов и результаты обработки полученных в опытах диаграмм $W(t)$ представлены в табл. 2.

После ударно-волнового нагружения исследуемые образцы в исходном (тип I) и наводороженном (тип II) состояниях разрезали и проводили металлографический анализ сечения в плоскости, перпендикулярной поверхности нагружения. На рис. 4 приведены фотографии сечений некоторых образцов.

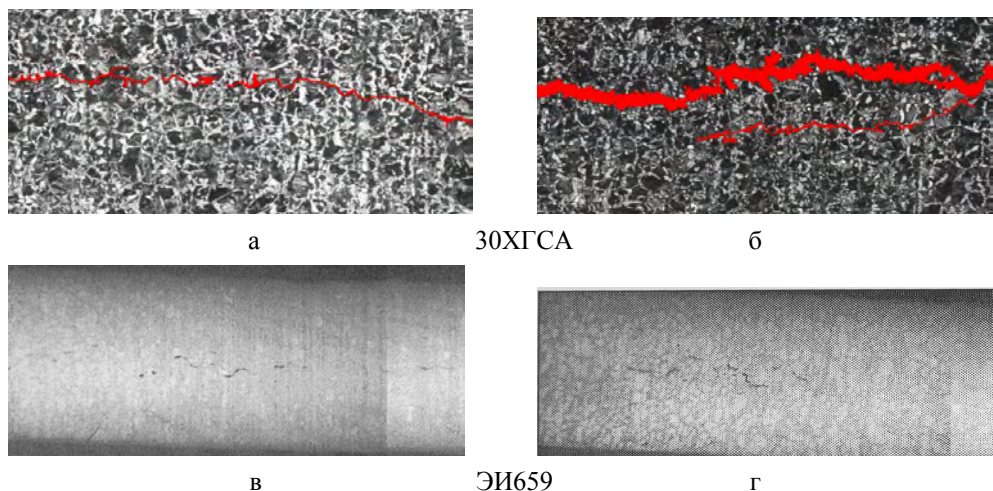


Рис. 4. Характер откольного повреждения образцов: а, в – в состоянии заводской поставки; б, г – в наводороженном состоянии

Анализ полученных результатов позволил выявить следующие особенности поведения исследуемых образцов при ударно-волновом нагружении.

30ХГСА. Для данной стали, при близких параметрах нагружения (W_0), наводороженные образцы имеют большую степень повреждения в плоскости откола, чем ненаводороженные образцы (рис. 4,а, б). При этом наблюдается сильное различие в характере зависимости $W(t)$ для свободной поверхности образцов в ненаводороженном и наводороженном состояниях. Так, для наводороженной стали наблюдаются более затянутые передние фронты профилей $W(t)$ и неярко выраженные откольные импульсы. Значения динамического предела текучести для наводороженной стали уменьшаются почти в два раза, а оценку откольной прочности с использованием таких зависимостей $W(t)$ проводить некорректно [14].

ЭИ659. Для образцов из этого сплава в исходном и наводороженном состояниях при близких скоростях нагружения ударником (W_0) степень повреждения образцов оказалась практически одинаковой (рис. 4,в, г). Близкими оказались и профили скорости свободной поверхности образцов (рис. 3,б), а также значения динамического предела текучести (табл. 2). Хотя следует отметить, что в наводороженном образце наблюдается более интенсивное образование пор и микротрещин и более заметное уменьшение величины откольной прочности. Тем не менее, существенного влияния наводороживания стали ЭИ659 на изменение ее динамической прочности не наблюдается.

Таблица 2

Результаты ударно-волновых экспериментов

Материал	Тип образцов	W_0 , м/с	$\Delta_{отк}$, мм	Y_g , ГПа	$\sigma_{отк}$, ГПа
ЭИ659	I	359	2,0	1,0	4,0
	II	360	2,2	1,1	3,4
30ХГСА	I	204	2,5	1,1	1,3
		207	2,7	1,5	1,7
		520	2,4	1,1	1,9
	II	193	1,6	0,7	–
		198	1,7	0,4	–
		240	1,5	0,7	–
241	1,4	0,7	–		

Таким образом, полученные в ударно-волновых экспериментах данные свидетельствуют о непротиворечивости выводов о влиянии водорода на прочностные характеристики исследуемых марок стали, сделанных на основе результатов квазистатических испытаний.

Заключение

Впервые с использованием квазистатических ($\dot{\epsilon} \approx 4.5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$) и ударно-волновых ($\dot{\epsilon} \approx 5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$) испытаний проведено исследование влияния водорода на пластические и прочностные характеристики сталей 30ХГСА и ЭИ659.

Показано что сталь ЭИ659 более устойчива к воздействию водорода, чем сталь 30ХГСА, что объясняется легированием стали ЭИ659 более сильными карбидообразующими элементами (вольфрамом, ванадием) по сравнению со сталью 30ХГСА (марганец, хром). В результате карбидные фазы стали ЭИ659 являются более водородоустойчивыми и граница обезуглероживания при воздействии водорода смещается в сторону более высоких температур, давлений и времени выдержки.

Несмотря на заметное водородное охрупчивание, характеристики пластичности стали ЭИ659 по величине остаются на достаточно высоком уровне ($\delta \geq 10\%$ и $\psi \geq 20\%$), а прочностные характеристики практически не изменяются, ее можно рекомендовать в качестве материала конструкций, работающих в контакте с водородом при высоких давлении и температуре и она, по сравнению со сталью 30ХГСА, является более предпочтительным конструкционным материалом оболочек, работающих в контакте с водородом при высоких давлениях и температурах в условиях ударно-волновых нагружений.

Список литературы

1. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974.
2. Калачев Б. А. Водородная хрупкость металлов. М.: Металлургия, 1985. С. 217.
3. Швед М. М. Изменение эксплуатационных свойств железа и стали под влиянием водорода. Киев: Наукова думка, 1985. С. 120.
4. Галактионова Н. А. Водород в металлах. М.: Металлургия, 1967.
5. Арчаков Ю. А. Водородная коррозия стали. М.: Металлургия, 1985.
6. Изотопы водорода. Фундаментальные и прикладные исследования: Сб. статей / Под ред. А. А. Юхимчука. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2009. С. 697.
7. Фортов В. Е. Экстремальные состояния вещества. М.: Физматлит, 2009.
8. Козырев А. С. Газодинамический термоядерный синтез. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2005. С. 144.
9. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
10. Минеев В. Н., Погорелов В. П., Иванов А. Г. // ФГВ. 1978. 14. 129.
11. Barker L. M., Hollenbach R. E. // J. Appl. Phys. 1972. 43. 4665.
12. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортов В. Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996.
13. Бликов А. О., Ерунов С. В., Огородников В. А. и др. // Сб. трудов «Х Харитоновские научные чтения. Мощные лазеры и исследования физики высоких плотностей энергии». Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008.
14. Огородников В. А., Иванов А. Г., Лучинин В. И. и др. // ФГВ. 1999. 35. 105.