

УДК [539.4+539.217.5]:546.11

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ СТАЛИ МАРОК 30ХГСА И ЭИ659 ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ И УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ

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

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188 Саров, Россия
E-mails: VAOgorodnikov@vniief.ru, AAYukhimchuk@vniief.ru, MAMochalov@vniief.ru,
AVAndramanov@vniief.ru, AYBaurin@vniief.ru, AOBlikov@vniief.ru,
IEBoytssov@vniief.ru, SVErunov@vniief.ru, IPMaksimkin@vniief.ru, ILMalkov@vniief.ru,
ASPupkov@vniief.ru, EVShevnin@vniief.ru

Экспериментально исследовано влияние водорода на прочность и пластичность стали марок 30ХГСА, ЭИ659 в условиях квазистатических и ударно-волновых испытаний. По результатам испытаний образцов в исходном состоянии и предварительно наводороженных при температуре 773 К и давлении в водороде 50 МПа в течение 24 ч определялась чувствительность выбранных марок стали к наводороживанию в воздухе при нормальном давлении или в водороде при давлении 25 МПа. Установлено, что сталь марки ЭИ659, легированная вольфрамом и ванадием, менее чувствительна к воздействию водорода, чем сталь марки 30ХГСА, легированная марганцем и хромом.

Ключевые слова: прочность, пластичность, сталь, водород, квазистатические и ударно-волновые испытания.

DOI: 10.15372/PMTF20160512

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 при увеличении температуры или давления водорода в такой системе скорость этих процессов увеличивается, а при увеличении скорости деформации — уменьшается. При наводороживании металла его структура деградирует, что может приводить к уменьшению пластичности и прочности. Влияние водорода на процессы разрушения да-

же таких наиболее исследованных сплавов, как стали, изучено недостаточно. В ряде случаев, например в кумулирующих системах перспективных энергетических устройств [7, 8], водородосодержащая газовая среда первоначально находится в оболочке из стали при высоких начальных статических давлениях ($20 \div 100$ МПа). При сжатии оболочки с газом, например с помощью продуктов взрыва, после выхода ударной волны на внутреннюю границу оболочки в результате взаимодействия падающей и отраженной волн разгрузки в материале оболочки возникают растягивающие напряжения, что может привести к высокоскоростному разрушению ее материала (расслоению или отколу) [9]. В настоящее время в литературе отсутствуют экспериментальные данные о влиянии наводороживания на сдвиговую и откольную прочности сталей, необходимые для построения определяющих соотношений, описывающих их сопротивление высокоскоростному сжатию и растяжению. В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований квазистатического и высокоскоростного ударно-волнового деформирования и разрушения водородостойкой стали марки ЭИ659 и стали марки 30ХГСА в исходном и наводороженном состояниях.

1. Поведение сталей марок 30ХГСА и ЭИ659 при квазистатических испытаниях. Исследования проводились на стандартных образцах с диаметром рабочей части 3 мм, выполненных в соответствии с ГОСТ 1497-84. Влияние водорода на механические свойства сталей оценивалось по результатам испытаний на растяжение образцов четырех типов: образцов без наводороживания на воздухе (тип I); наводороженных на воздухе (тип II); образцов без наводороживания в водороде (тип III); наводороженных в водороде (тип IV).

Наводороживание образцов проводилось путем их выдержки в течение 24 ч в водороде при давлении 50 МПа и температуре 773 К. Для образцов из стали марки 30ХГСА в исходном и наводороженном состояниях концентрация водорода составила 2,3 и 25,0 мг/кг, а для образцов из стали марки ЭИ659 — 1,8 и 5,0 мг/кг соответственно.

Растяжение образцов проводилось при температуре 293 К со скоростью деформации $4,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ на разрывной машине UTS 100K. При испытании образцов в среде водорода разрывная машина UTS 100K доукомплектовывалась специальными устройствами: испытательной камерой и газовакуумным оборудованием [6]. Описание процессов наводороживания сталей, процедуры определения концентрации водорода в образцах с помощью анализатора ELTRA OH900 приведено в [10]. Испытания образцов в среде водорода проводились при давлении водорода 25 МПа после их выдержки при этом давлении в течение 1 ч.

Диаграммы деформирования образцов при различных режимах испытаний приведены на рис. 1, в табл. 1 представлены результаты определения механических характеристик: условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, временного сопротивления разрыву σ_B , относительного удлинения при разрыве δ , относительного сужения ψ . Видно, что сталь марки 30ХГСА обладает высокой чувствительностью к воздействию водорода. Выдержка образцов этой марки стали в водороде при давлении 50 МПа и температуре 773 К в течение 24 ч привела к полной потере их пластичности и разрушению на упругом участке нагружения при последующих испытаниях как на воздухе (образцы типа II), так и в водороде (образцы типа IV). Также вследствие наводороживания образцов снизился предел прочности приблизительно на 70 %. Воздействие внешнего водорода (испытания образцов типа III) на сталь марки 30ХГСА привело к ее сильному охрупчиванию, но не к полной потере пластичности, как при испытаниях образцов типа II и IV. Временное сопротивление разрыву σ_B у образцов из стали марки 30ХГСА в исходном состоянии, испытанных в среде водорода (образцы типа III), уменьшилось приблизительно на 15 %.

В отличие от стали марки 30ХГСА сталь марки ЭИ659 оказалась более устойчивой к воздействию водорода. Как следует из табл. 1, водород (как внешний (образцы типа III),

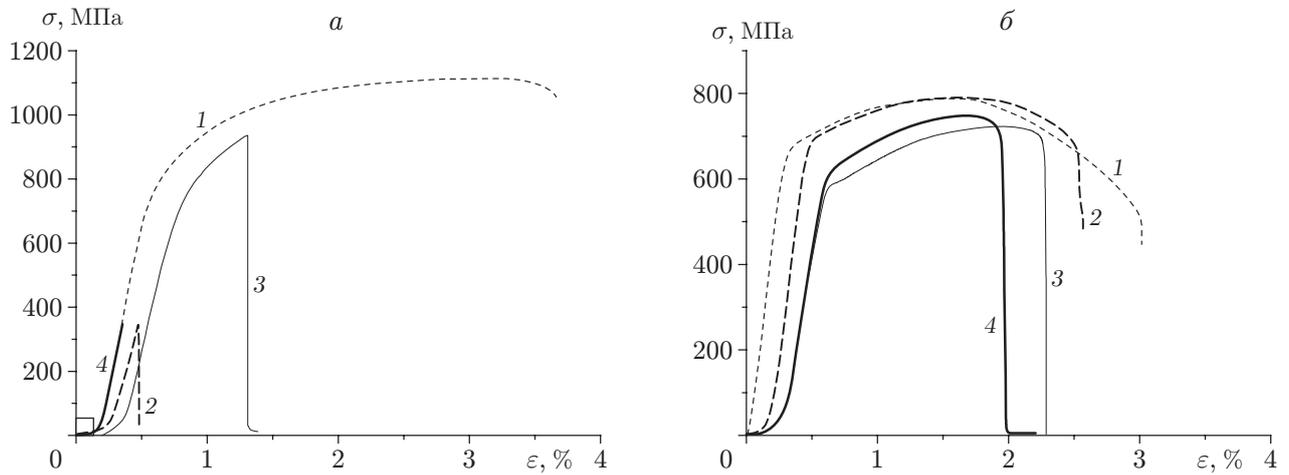


Рис. 1. $(\sigma-\varepsilon)$ -диаграммы растяжения образцов из стали марки 30ХГСА (а) и марки ЭИ659 (б) при различных режимах испытаний:
1 — образец типа I, 2 — образец типа II, 3 — образец типа III, 4 — образец типа IV

Таблица 1

Механические характеристики образцов из стали марок 30ХГСА и ЭИ659 при различных условиях растяжения

Марка стали	Тип образца	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
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
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

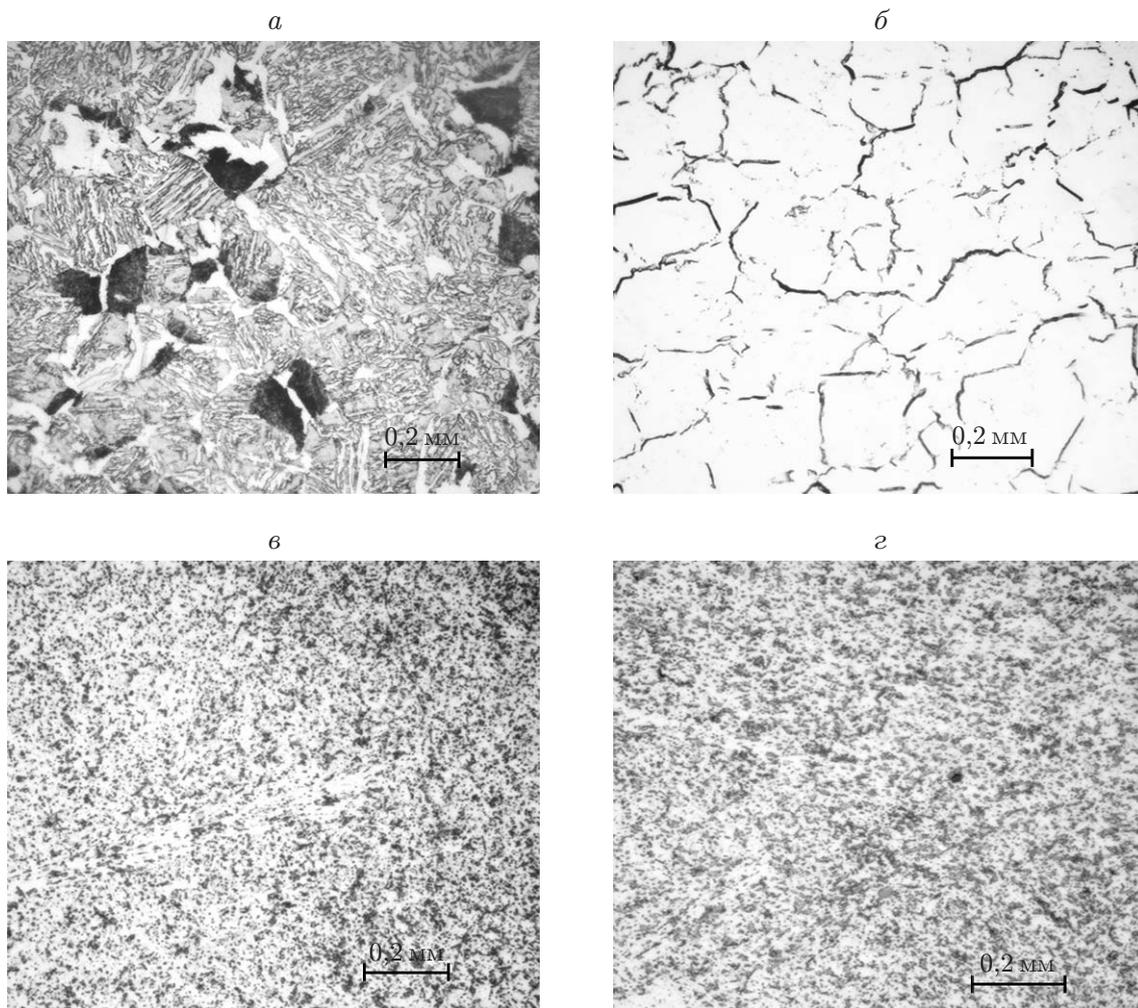
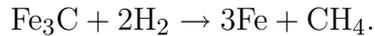


Рис. 2. Микроструктура стали марки 30ХГСА (*а, б*) и марки ЭИ659 (*в, з*):
а, в — до воздействия водорода, *б, з* — после воздействия водорода

так и внутренний (образцы типа II)) не оказывает существенного влияния на прочностные характеристики ($\sigma_{0,2}$, σ_B) стали марки ЭИ659, однако приводит к значительному уменьшению пластичности (δ , ψ). При этом сталь марки 30ХГСА более чувствительна к воздействию внутреннего водорода (образцы типа II), сталь марки ЭИ659 сильнее охрупчивается при испытаниях образцов в среде водорода (образцы типа III). Максимальное охрупчивание стали марки ЭИ659 наблюдается при совместном воздействии внутреннего и внешнего водорода (образцы типа IV). Из табл. 1 также следует, что наибольшее влияние водород оказывает на относительное сужение при разрыве стали марки ЭИ659, т. е. вызванное воздействием водорода охрупчивание стали этой марки происходит после локализации деформации (образования шейки) при растяжении образцов. При этом, несмотря на сильное охрупчивание в результате наводороживания, характеристики пластичности стали марки ЭИ659 остаются достаточно высокими: $\delta \geq 10\%$, $\psi \geq 20\%$.

На рис. 2 показаны микрошлифы поперечного сечения образцов исследуемых сталей до и после длительного наводороживания (образцы типа I, II). Результаты металлографических исследований показывают, что в стали марки 30ХГСА после наводороживания происходит необратимое изменение структуры: сталь практически полностью обезуглеродилась и по границам зерен образовались микротрещины (см. рис. 2, б). При этом мик-

ротвердость (по Виккерсу) стали марки 30ХГСА уменьшилась с 356 до 197 Нv. Причиной этого явления, называемого водородной коррозией, является взаимодействие водорода при повышенных давлениях и температурах с цементитом и рядом других карбидов, сопровождающееся образованием метана:



Вследствие больших размеров молекулы метана не могут диффундировать в кристаллическую решетку и, скапливаясь на границах зерен, создают высокое давление, вызывающее растрескивание стали марки 30ХГСА.

Структура стали марки ЭИ659 после наводороживания в аналогичных условиях изменилась незначительно: наблюдается некоторая коагуляция карбидных фаз (см. рис. 2,з), обусловленная, по-видимому, длительным тепловым воздействием. Микротвердость стали марки ЭИ659 не изменилась: до и после наводороживания она равна 268 Нv. Большая устойчивость к воздействию водорода стали марки ЭИ659 по сравнению со сталью марки 30ХГСА обусловлена тем, что сталь марки ЭИ659 легирована более “сильными” карбидообразующими элементами (вольфрам, ванадий), чем сталь марки 30ХГСА (марганец, хром). В результате карбидные фазы стали марки ЭИ659 являются более водородоустойчивыми и ее обезуглероживание при наводороживании происходит при больших температурах, давлениях и временах выдержки.

2. Поведение стали марок 30ХГСА и ЭИ659 при ударно-волновых испытаниях. Для исследования влияния водорода на прочностные характеристики сталей при ударно-волновом нагружении использовались образцы в форме дисков диаметром 50 мм и высотой 5 мм, которые изготавливались из прутков сплавов марок ЭИ659 и 30ХГСА. Испытывались образцы без наводороживания на воздухе (тип I) и наводороженные на воздухе образцы (тип II).

Ударно-волновое нагружение исследуемых образцов проводилось на установке БУТ-76 [11] с помощью ударников, изготовленных из стали тех же марок, толщиной $\Delta_1 = \Delta_2/2 = 2,5$ мм (Δ_2 — толщина образца). Скорость ударника при подлете к образцу W_0 измерялась с погрешностью не более 0,5 %. С помощью лазерного интерферометра измерялась скорость W свободной поверхности образца при выходе на нее ударной волны, эти данные использовались для определения прочности образцов на динамическое сжатие (динамический предел текучести) и растяжение (откольная прочность) в исходном и наводороженном состояниях стали [12, 13]. Разрешающая способность по времени при использовании данного метода составляет $2 \div 3$ нс, относительная погрешность измерения скорости свободной поверхности с помощью лазерного интерферометра равна ± 3 % [14]. Характерные профили скорости свободной поверхности, полученные в результате ударно-волнового нагружения образцов, приведены на рис. 3.

Полученная зависимость $W(t)$ использовалась для оценки прочностных характеристик образцов на сжатие и растяжение: динамического предела текучести $Y = [(1 - 2\nu)/(1 - \nu)]\sigma_y$ ($\sigma_y = 0,5\rho_0 c_0 W_y$ — предел текучести Гюгонио, оцениваемый по амплитуде упругого предвестника W_y) и откольной прочности $\sigma_* = 0,5\rho_0 c_0 (W_1 - W_2 + \delta W)$ (δW — упруго-пластическая поправка [13]; ρ_0 — плотность; c_0 — скорость звука; W_1, W_2 — амплитуды скорости в точках первых максимумов и минимумов зависимости $W(t)$; ν — коэффициент Пуассона). Скорость деформации материала образца составляла $\dot{\epsilon} \approx W/(2\Delta_1) = 5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$. Результаты экспериментов при различных условиях нагружения образцов представлены в табл. 2.

После ударно-волнового нагружения исследуемые образцы в исходном (тип I) и наводороженном (тип II) состояниях разрезались и проводился металлографический анализ сечения в плоскости, перпендикулярной поверхности нагружения. На рис. 4 показаны микроструктуры некоторых образцов.

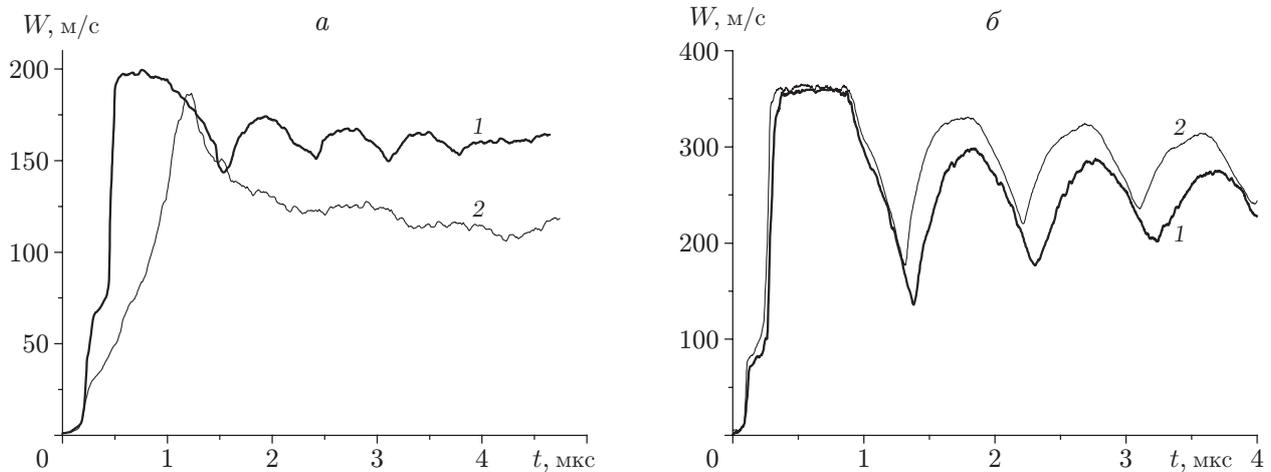


Рис. 3. Профили скорости свободной поверхности при ударно-волновом нагружении образцов из стали марки 30ХГСА (а) и марки ЭИ659 (б) различного типа: 1 — тип I, 2 — тип II

Таблица 2

Механические характеристики образцов из стали марок 30ХГСА и ЭИ659 при различных скоростях W_0 ударно-волнового нагружения

Марка стали	Тип образца	W_0 , м/с	Δ_* , мм	Y , ГПа	σ^* , 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	—

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

Для стали марки 30ХГСА при приблизительно одинаковых скоростях нагружения W_0 наводороженные образцы имеют большую степень повреждения в плоскости откола, чем ненаводороженные образцы (см. рис. 4, а, б). При этом характер зависимости $W(t)$ для свободной поверхности образцов в ненаводороженном и наводороженном состояниях существенно различается. Так, в случае наводороженной стали наблюдаются более вытянутые передние фронты профилей $W(t)$ и слабовыраженные откольные импульсы (см. рис. 3). Динамический предел текучести для наводороженной стали уменьшается почти в два раза, поэтому оценку откольной прочности с использованием таких зависимостей $W(t)$ проводить некорректно [15].

Для образцов из сплава марки ЭИ659 в исходном и наводороженном состояниях при близких значениях скорости нагружения ударником W_0 степень повреждения образцов практически одинакова (см. рис. 4, в, г). Почти одинаковыми оказались и профили скорости свободной поверхности образцов (см. рис. 3, б), а также значения динамического предела текучести (см. табл. 2). Следует отметить, что в наводороженном образце происходит

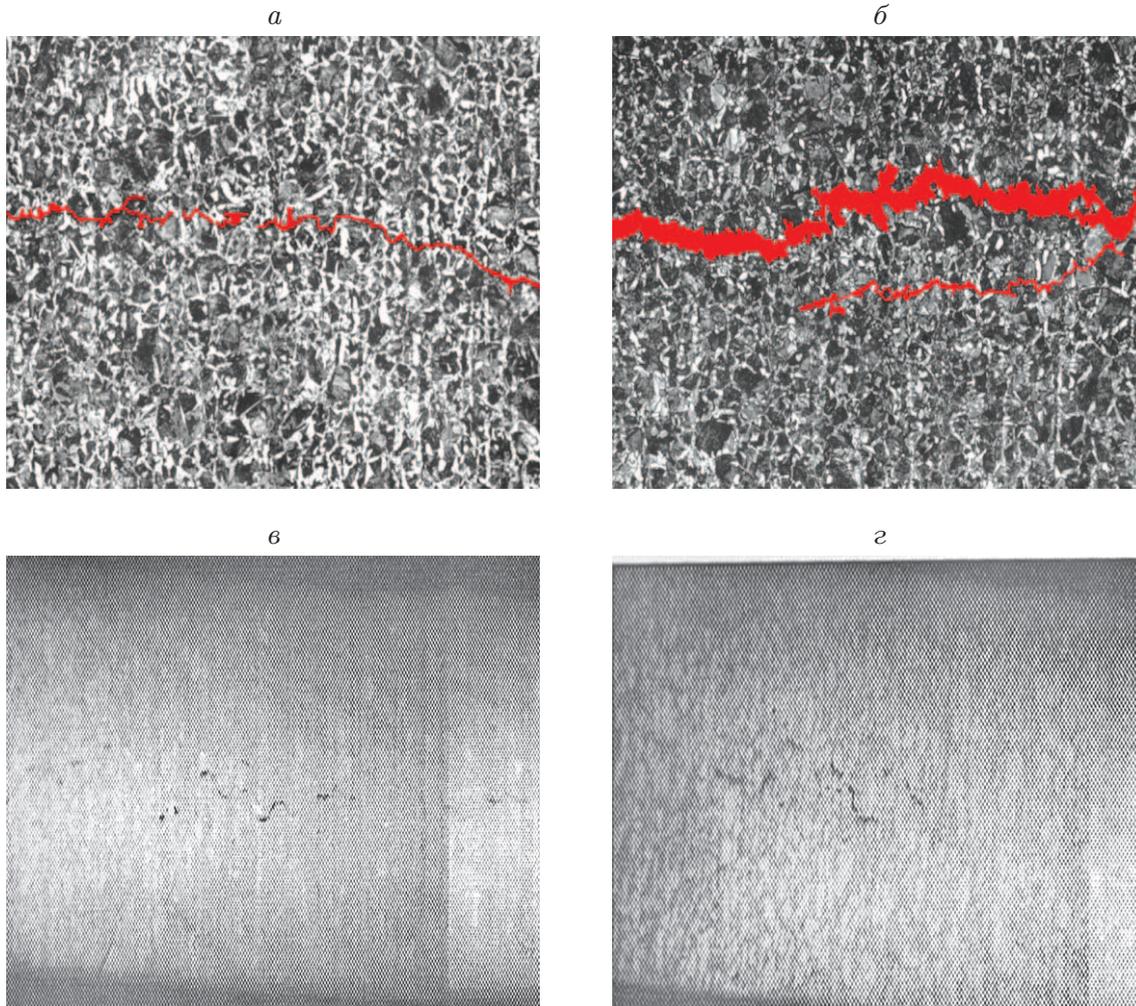


Рис. 4. Микроструктура стали марки 30ХГСА (*а, б*) и марки ЭИ659 (*в, г*) при откольном повреждении образцов:
а, в — в состоянии заводской поставки, *б, г* — в наводороженном состоянии

более интенсивное образование пор и микротрещин и более существенное уменьшение откольной прочности. Однако значительного влияния наводороживания стали марки ЭИ659 на ее динамическую прочность не наблюдается.

Таким образом, результаты ударно-волновых экспериментов не противоречат выводам о влиянии водорода на прочностные характеристики исследуемых марок стали, сделанным на основе результатов квазистатических испытаний.

Заключение. Впервые на основе квазистатических ($\dot{\epsilon} \approx 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$) и ударно-волновых ($\dot{\epsilon} \approx 5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$) экспериментов проведено исследование влияния водорода на пластические и прочностные характеристики стали марок 30ХГСА и ЭИ659.

Показано, что сталь марки ЭИ659 более устойчива к воздействию водорода, чем сталь марки 30ХГСА. Это объясняется тем, что сталь марки ЭИ659 легирована более “сильными” карбидообразующими элементами (вольфрамом, ванадием), чем сталь марки 30ХГСА (марганец, хром). В результате карбидные фазы стали марки ЭИ659 являются более водородоустойчивыми и обезуглероживание при воздействии водорода происходит при больших значениях температуры, давления и времени выдержки.

Несмотря на значительное водородное охрупчивание (характеристики пластичности остаются достаточно высокими ($\delta \geq 10\%$, $\psi \geq 20\%$), а прочностные характеристики практически не изменяются), сталь марки ЭИ659 можно рекомендовать в качестве материала конструкций, работающих в контакте с водородом при высоких давлениях и температурах. Сталь марки ЭИ659 является более предпочтительным по сравнению со сталью марки 30ХГСА конструкционным материалом оболочек, работающих в контакте с водородом при высоких давлениях и температурах в условиях ударно-волновых нагрузений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Черепанов Г. П.** Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974.
2. **Калачев Б. А.** Водородная хрупкость металлов. М.: Metallurgia, 1985.
3. **Швед М. М.** Изменение эксплуатационных свойств железа и стали под влиянием водорода. Киев: Наук. думка, 1985.
4. **Галактионова Н. А.** Водород в металлах. М.: Metallurgia, 1967.
5. **Арчаков Ю. А.** Водородная коррозия стали. М.: Metallurgia, 1985.
6. **Бойцов Е. И., Балуев В. В., Гришечкин С. К. и др.** Исследование влияния водорода высокого давления на механические свойства некоторых нержавеющей сталей в диапазоне температур от минус 80 °С до комнатной // *Изотопы водорода. Фундаментальные и прикладные исследования: Сб. ст. / Под ред. А. А. Юхимчука.* Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2009. С. 324–329.
7. **Фортов В. Е.** Экстремальные состояния вещества. М.: Физматлит, 2009.
8. **Козырев А. С.** Газодинамический термоядерный синтез. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2005.
9. **Зельдович Я. Б.** Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. М.: Наука, 1966.
10. **Пат. 49273 РФ, МПК В 01 D 53/00.** Установка для определения содержания газообразных компонентов в исследованном образце / А. А. Юхимчук, С. В. Златоустовский, П. Л. Бабушкин, У. Полемитис // *Бюл. изобрет. и полезных моделей.* 2005. № 31.
11. **Минеев В. Н., Погорелов В. П., Иванов А. Г. и др.** Установка для исследования поведения материалов и конструкций при динамических нагрузках // *Физика горения и взрыва.* 1978. Т. 14, № 3. С. 129–133.
12. **Barker L. M., Hollenbach R. E.** Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface // *J. Appl. Phys.* 1972. V. 43, N 11. P. 4669–4675.
13. **Канель Г. И.** Ударно-волновые явления в конденсированных средах / Г. И. Канель, С. В. Разоренов, А. В. Уткин, В. Е. Фортов. М.: Янус-К, 1996.
14. **Бликов А. О., Ерунов С. В., Огородников В. А. и др.** Сравнительное исследование профилей упругопластических ударных волн, регистрируемых с помощью манганинового, емкостного датчиков и лазерного интерферометра // *Сб. тр. 10-х Харитон. науч. чтений “Мощные лазеры и исследования физики высоких плотностей энергии”*, Саров, 11–14 марта 2008 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2008. С. 141–145.
15. **Огородников В. А., Иванов А. Г., Лучинин В. И. и др.** Масштабный эффект при динамическом разрушении (отколе) хрупких и вязких материалов // *Физика горения и взрыва.* 1999. Т. 35, № 1. С. 108–114.