

ВЛИЯНИЕ ГАЗООБРАЗНОГО ВОДОРОДА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АУСТЕНИТНЫХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ –50 °С

И. Е. Бойцов, Th. Michler¹, Н. Ю. Туманова, Е. В. Шевнин, А. А. Юхимчук

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров

¹Фирма Адам Опель, г. Руссельхайм, Германия

Введение

При контакте конструкционных материалов (КМ) с водородом и водородосодержащими средами их свойства могут ухудшаться – наблюдается явление, известное как "водородное охрупчивание" металлов и сплавов. Деградация служебных свойств КМ в результате "водородного охрупчивания" может привести к непредсказуемому разрушению конструкций. Поэтому проблема исследования воздействия водорода на механические свойства КМ является актуальной при выборе и назначении материалов конструкций различного промышленного назначения.

В настоящем докладе представлены результаты исследования влияния воздействия газообразного водорода на механические свойства 14 марок коммерческих нержавеющей сталей аустенитного класса с содержанием никеля 8,1–24,9 %. Описано испытательное оборудование и методика исследований. Представлены результаты испытаний стандартных цилиндрических образцов из исследованных сталей на растяжение в среде водорода и гелия при давлении 40 МПа и при температуре –50 °С.

Конструкция испытательной установки и методика исследования водородостойкости сталей

Влияние воздействия водорода на механические свойства аустенитных нержавеющей сталей оценивалось по результатам испытаний стандартных цилиндрических образцов (диаметр рабочей части – Ø3 мм; № 9, тип IV, ГОСТ 1497-84) на растяжение в среде газообразного водорода и инертного газа (гелия) при давлении 40 МПа и при температуре –50 °С.

Специально для проведения таких испытаний во ВНИИЭФ была разработана установка /1/ на базе промышленной разрывной машины UTS 100К, которая была оснащена дополнительным оборудованием: камерой высокого давления, неподвижным захватом, подвижным захватом с датчиком силы (который измеряет нагрузку на образце независимо от величины давления газа в камере и силы трения в уплотнении подвижного захвата), устройствами охлаждения (нагрева) камеры и элементами ее герметизации, системой газовакуумного обеспечения.

Растяжение образцов осуществляется при помощи разрывной машины UTS 100K (максимальная рабочая нагрузка – 100 кН; скорость перемещения траверсы – 0,01...500 мм/мин; погрешность измерения силы – $\pm 0,5\%$; точность позиционирования траверсы – 1 мкм).

Для того чтобы в процессе испытания измерять нагрузку исключительно только на образце (независимо от величины давления газа в камере и силы трения в уплотнении подвижного захвата), был разработан датчик силы, который является частью подвижного захвата и имеет следующие технические характеристики: максимальная рабочая нагрузка – 10 кН; погрешность измерения силы – менее 1 %.

На рис. 1 приведена принципиальная схема установки.

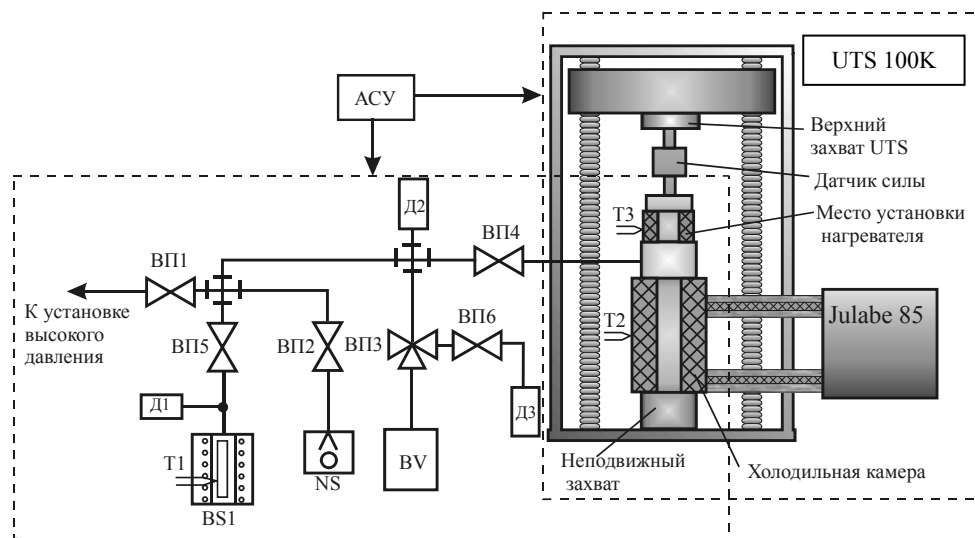


Рис. 1. Принципиальная схема установки: ВП1–ВП6 – вентили высокого давления; Д1–Д3 – датчики давления, BS1 – металлгидридный источник водорода; NS – насос форвакуумный; BV – буферная емкость; UTS 100K – разрывная машина; "Julabe 85" – высокودинамичная температурная система; АСУ – автоматизированная система управления; T1–T3 – термодпары

Измерение, поддержание и контроль величин рабочих параметров при испытаниях (давление, температура и нагрузка) осуществляется в автоматическом режиме с помощью (АСУ).

По результатам испытаний образцов на растяжение строились диаграммы в координатах "напряжение-деформация" и стандартным образом определялись (по ГОСТ 1497-84) следующие характеристики механических свойств: σ_B – временное сопротивление разрыву, $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести, δ_5 – относительное удлинение после разрыва, ψ – относительное сужение.

Влияние водорода на характеристики механических свойств оценивалось по формуле (1) как снижение характеристики (в процентах), вызванное воздействием водорода:

$$\Delta X = \frac{X(\text{He}) - X(\text{H}_2)}{X(\text{He})} 100\%, \quad (1)$$

где $X(\text{He})$ и $X(\text{H}_2)$ – характеристика, полученная при испытаниях образцов в среде гелия и водорода соответственно. Чем меньше величина ΔX , тем сталь менее чувствительна к водородному охрупчиванию.

Результаты исследования водородостойкости некоторых аустенитных нержавеющей сталей

Исследовано воздействие газообразного водорода при давлении 40 МПа и температуре -50°C на механические свойства четырнадцати зарубежных марок нержавеющей сталей аустенитного класса. Химический состав сталей приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исследованных сталей

Марка материала DIN/SUS	Обозначение материала	C, %	S, %	P, %	Mn, %	Si, %	Ni, %	Cr, %	Mo, %	Ti, %
1.4435	1	0,019	0,019	0,025	1,57	0,52	12,6	17,01	2,51	–
1.4571	3	0,02	0,029	0,03	1,92	0,68	11,15	16,5	2,08	0,18
SUS316L	7	0,019	0,024	0,029	1,41	0,49	12,19	17,13	2,05	–
SUS316L*	8	0,016	0,003	0,033	1,19	0,68	12,15	17,4	2,057	–
1.4305	12	0,058	0,25	0,026	1,73	0,36	8,78	17,67	0,3	–
1.4401	14	0,05	0,002	0,027	1,29	0,66	11,16	16,95	2,06	–
1.4401*	15	0,03	0,001	0,022	1,31	0,43	10,72	16,85	2,2	–
1.4404	20	0,025	0,004	0,023	1,59	0,45	10,04	16,75	2,072	–
1.4571*	21	0,031	0,004	0,023	1,3	0,46	11,08	16,61	2,135	0,3
1.4301	22	0,028	0,004	0,02	1,43	0,4	8,11	18,15	0,076	–
1.4435*	23	0,019	0,001	0,025	1,21	0,56	12,56	17,44	2,5	–
1.4306	24	0,018	0,002	0,033	1,52	0,38	10,18	18,04	–	–
1.4429	26	0,021	0,0003	0,025	1,14	0,58	12,74	17,39	2,55	–
A286	33	0,04	0,0004	0,018	1,12	0,33	24,93	15,01	1,19	1,96

Примечание: * – повторяющиеся марки сталей отличаются сортаментом и химическим составом.

Условия испытаний и их результаты приведены в табл. 2 (скорость деформации при испытаниях составляла $5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$). В табл. 3 представлено вызванное воздействием водорода относительное снижение механических свойств сталей, которое вычислялось по формуле (1).

Таблица 2

Результаты испытаний образцов на растяжение в газовых средах (гелия и водорода) при давлении 40 МПа и температуре $-50 \text{ }^\circ\text{C}$

Материал		Испытательная среда	Характеристики механических свойств			
DIN/SUS No	Обозначение материала		σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ
			МПа		%	
1.435	1	He	724	320	73,8	83,0
		H ₂	715	329	70,7	69,4
1.571	3	He	796	269	62,2	77,8
		H ₂	634	287	24,5	26,8
SUS316L	7	He	746	343	74,4	84,0
		H ₂	669	353	37,3	36,7
SUS316L*	8	He	762	325	69,7	86,4
		H ₂	688	349	34,1	31,3
1.305	12	He	1075	483	44,7	59,0
		H ₂	616	471	13,8	13,2
1.401	14	He	1174	877	25,7	81,0
		H ₂	1164	858	16,0	16,5
1.401*	15	He	1279	950	17,7	78,4
		H ₂	1287	1013	8,6	7,2
1.404	20	He	881	336	57,0	75,4
		H ₂	582	356	14,2	11,8
1.571*	21	He	829	330	44,7	73,0
		H ₂	598	308	19,7	22,4
1.301	22	He	1056	369	58,8	81,0
		H ₂	542	404	6,5	13,9
1.435*	23	He	778	360	69,8	81,2
		H ₂	771	373	56,2	43,2

Окончание табл. 2

Материал		Испы- тательная среда	Характеристики механических свойств			
DIN/SUS No	Обозна- чение материала		σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ
			МПа		%	
1.306	24	He	859	320	58,8	81,0
		H ₂	542	330	14,5	17,3
1.429	26	He	838	447	62,8	80,8
		H ₂	836	453	46,9	54,7
A286	33	He	1125	720	30,4	51,9
		H ₂	1106	798	30,0	56,8

Примечание: * – повторяющиеся марки сталей отличаются сортаментом и химическим составом.

Из табл. 3 видно, что наиболее чувствительными к воздействию внешне-го водорода являются характеристики пластичности (δ_5 , ψ). Так как наиболее сильное влияние водород оказывает на характеристику ψ , то в дальнейшем степень водородного охрупчивания исследованных сталей оценивалась по изменению относительного сужения $\Delta\psi$. Чем меньше величина $\Delta\psi$, тем сталь менее чувствительна к водородному охрупчиванию.

Таблица 3

Относительное снижение характеристик механических свойств сталей, вызванное воздействием водорода

Марка стали		Снижение* характеристик:			
		$\Delta\sigma_B$	$\Delta\sigma_{0,2}$	$\Delta\delta_5$	$\Delta\psi$
		%			
1	1.4435	1,24	-2,81	4,20	16,38
3	1.4571	20,35	-6,69	60,61	65,55
7	SUS316L	10,32	-2,91	49,86	56,30
8	SUS316L	9,7	-7,38	51,07	63,77
12	1.4305	42,69	2,48	69,12	77,62
14	1.4401	0,85	2,16	37,74	79,62
15	1.4401	-0,62	-6,63	51,41	90,81
20	1.4404	33,93	-5,95	75,08	84,35
21	1.4571	27,86	6,66	55,9	69,31
22	1.4301	48,67	-9,48	88,94	82,83
23	1.4435	0,89	-3,61	19,48	46,79

Окончание табл. 3

Марка стали		Снижение * характеристик:			
		$\Delta\sigma_B$	$\Delta\sigma_{0,2}$	$\Delta\delta_5$	$\Delta\psi$
		%			
24	1.4306	36,90	-3,12	75,34	32,54
26	1.4429	0,23	-1,34	25,31	32,30
33	A286	1,68	-10,83	1,31	-9,44

Примечание: * – знак минус означает увеличение характеристики.

В проведенных ранее исследованиях водородостойкости семи марок аустенитных нержавеющей сталей при комнатной температуре /2/ была отмечена явная зависимость степени водородного охрупчивания сталей от содержания в них никеля (см. табл. 4 и рис. 2) в интервале концентраций 8,64–12,19 % Ni. Так же в упомянутой работе было показано, что наибольшая степень водородного охрупчивания аустенитных нержавеющей сталей наблюдается при температурах от –50 до –80 °С.

Таблица 4

Влияние содержания Ni на водородное охрупчивание сталей /2/

Марка стали (полуфабрикат)	1.4301 (пруток)	1.4404 (пруток)	1.4404 (плита)	1.4306 (плита)	1.4571 (плита)	1.4571 (пруток)	SUS316L (пруток)
Содержание Ni, %	8,64	9,8	10,04	10,18	11,08	11,15	12,19
$\Delta\psi$, %	58,5	48,8	44,0	51,5	22,1	14,6	8,2

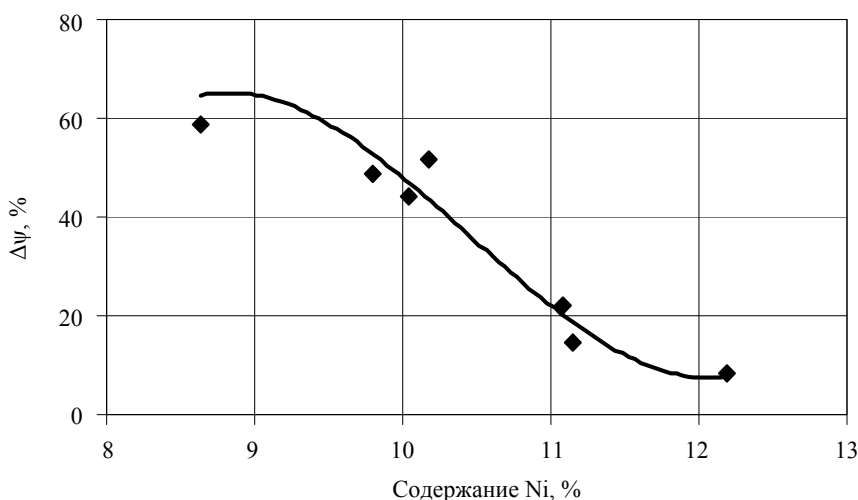


Рис. 2. Зависимость степени водородного охрупчивания аустенитных нержавеющей сталей от содержания Ni /2/

Результаты, полученные в настоящей работе при температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ для четырнадцати марок сталей с различным содержанием никеля (от 8,11 до 24,93 %), подтвердили такую зависимость.

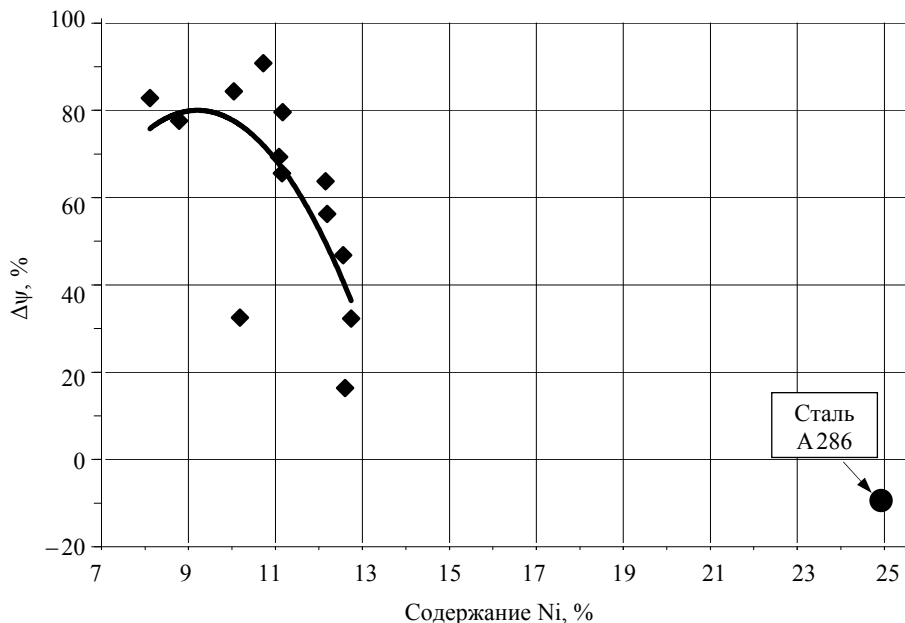


Рис. 3. Зависимость степени водородного охрупчивания аустенитных нержавеющих сталей от содержания Ni

Как видно из рис. 3, при концентрации $\text{Ni} \leq 11\%$ наблюдается сильное охрупчивание сталей, вызванное воздействием водорода, — величина $\Delta\psi > 80\%$. С увеличением содержания Ni влияние водорода на пластичность сталей уменьшается и при концентрации Ni 12,6–12,7 % величина $\Delta\psi$ составляет $\sim 16\text{--}32\%$. Сталь марки А286, упрочненная дисперсной γ' -фазой и содержащей 24,9 % никеля, оказалась и вовсе не чувствительной к воздействию газообразного водорода.

Заключение

Выполнены исследования влияния водорода на механические свойства нержавеющей сталей аустенитного класса четырнадцати марок при температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении водорода 40 МПа. По результатам исследований установлено, что:

– при повышении содержания Ni степень водородного охрупчивания сталей уменьшается;

– сталь марки А286, упрочненная дисперсной γ' -фазой и содержащей 24,9 % никеля, оказалась не чувствительна к воздействию газообразного водорода.

Список литературы

1. Шевнин Е. В., Бойцов И. Е., Фильчагин С. В., Туманова Н. Ю. "Установка для испытаний образцов на растяжение в газообразном водороде при давлении до 70 МПа в интервале температур от – 150 до + 300 °С". Сборник докладов Четвертой международной Школы молодых ученых и специалистов. IHISM-08 JUNIOR. 04–08 июля 2008 г.
2. Бойцов И. Е., Балувев В. В., Гришечкин С. К., Michler Т., Малков И. Л., Туманова Н. Ю., Фильчагин С. В., Шевнин Е. В., Юхимчук А. А. "Исследование влияния водорода высокого давления на механические свойства некоторых нержавеющей сталей в диапазоне температур от –80 °С до комнатной". Сборник докладов Третьей международной Школы молодых ученых и специалистов. IHISM-07 JUNIOR. 02–07 июля 2008 г. С. 304–309.