

## МЕТОДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СРЕДЕ ВОДОРОДА

*И. Е. Бойцов*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

### **Введение**

Для конструкций, работающих в контакте с водородосодержащими газовыми средами, существует опасность катастрофического хрупкого разрушения, вызванного водородом из-за явления, получившего название «водородного охрупчивания» (ВО). Поэтому одно из основных требований, предъявляемых при выборе и назначении материала таких конструкций – это его стойкость к воздействию водорода. В настоящее время нет единой общей теории или модели ВО. Предрасположенность к ВО и механизм ВО для каждого металла или сплава имеют свою специфику, обусловленную особенностями взаимодействия с водородом для каких-то конкретных условий. Поэтому для оценки водородостойкости КМ, как при выборе материалов разрабатываемых конструкций, так и при изменении условий эксплуатации применяемых конструкций (температуры, давления, времени воздействия, уровня напряжений, наличия концентраторов напряжений и т. д.) требуется проведение специальных экспериментов и исследований. В данной работе представлены основные методы и подходы, применяемые для изучения водородостойкости конструкционных материалов (КМ).

Прежде чем рассматривать такие методы следует подробнее остановиться на понятии «ВО» (или «водородной хрупкости») и его особенностях. Сам термин «ВО» является условным, так как довольно часто водород не приводит к чисто хрупкому разрушению. Как отмечается в монографии [1], «под термином «водородная хрупкость» в настоящее время понимают всю совокупность отрицательных явлений, обусловленных повышенным содержанием водорода в металле». В данном определении ключевыми словами являются «вся совокупность отрицательных явлений». То есть под ВО металлов и сплавов понимается не только полная или частичная потеря их пластичности в результате воздействия водорода, но также снижение любых механических или служебных свойств. Причем отрицательное снижение. Так, вызванное водородом снижение сопротивления деформации титановых сплавов при их высокотемпературном водородном пластифицировании не считается проявлением ВО, потому что рассматривается не как отрицательное явление.

Необходимо также отметить, что в связи с разнообразием форм проявления водородной хрупкости металлов и сплавов нет универсального метода, который позволял бы изучать все виды и механизмы ВО КМ. Поэтому важный момент, который нужно учитывать при выборе методов исследования ВО

конкретного КМ в конкретных условиях, это ясное представление о том, какие виды и механизмы ВО задействованы в данном случае и какие методы и подходы применимы именно для этих видов и механизмов. Многие авторы делали попытки перечислить все формы вредного воздействия водорода на металлы. Наиболее полный обзор различных видов и механизмов водородной хрупкости металлов приведен в монографии Б. А. Колачева [1]. Однако, следует отметить, что попытки систематизировать и классифицировать накопленные экспериментальные и теоретические знания в области ВО металлов имеют условный характер. Так, если в вышеупомянутой работе [1] рассматриваются семь видов и 14 форм ВО, то в более поздней работе этого же автора [2] говорится уже о 27 формах отрицательного влияния водорода на металлы.

Очевидно, что при оценке водородостойкости КМ проводить исследование всех 27 форм и механизмов ВО было бы слишком трудоемко и на практике не реально. Поэтому при выборе методов исследования ВО КМ вполне достаточно воспользоваться более общей, упрощенной классификацией ВО, предложенной в работах [3, 4]. Различные механизмы и формы проявления водородной хрупкости металлов авторы этих работ [3, 4] разбили в зависимости от характера взаимодействия КМ с водородом на три основные группы. А именно, ВО: в результате химического взаимодействия водорода с КМ или его компонентами (ВОХВ); вызванное внутренним (растворенным) водородом в металлах (ВВО); в среде газообразного водорода (ВОГС). В соответствии с принятой классификацией ниже будут рассматриваться и методы, применяемые для исследования ВО КМ.

Как правило, для разных методов оценку влияния водорода на характеристики механических свойств проводят сравнением результатов испытаний исходных образцов на воздухе (или в среде инертного газа) с результатами аналогичных испытаний в среде водорода (или на воздухе предварительно выдержанных в среде водорода образцов). В литературе наиболее часто для такой оценки используется показатель  $\beta$ , определяемый из выражения (1) или (2):

$$\beta_1(X) = \frac{X(H_2)}{X(He)}, \quad (1)$$

$$\beta_2(X) = \frac{X(He) - X(H_2)}{X(He)} \times 100 \%, \quad (2)$$

где  $X(He)$  – характеристика механических свойств исходных образцов, испытанных в инертной среде;  $X(H_2)$  – аналогичная характеристика исходных образцов, испытанных в водороде (или предварительно выдержанных в среде водорода образцов, испытанных в инертной среде). Чем меньше показатель  $\beta_1(X)$  или чем больше  $\beta_2(X)$ , тем чувствительнее характеристика  $X$  к воздействию водорода.

## Методы изучения ВО КМ, вызванного химическим взаимодействием с водородом

К этому виду ВО КМ относятся: «водородная болезнь» в меди, серебре и никеле (образование пор, заполненных парами воды, в результате взаимодействия проникающего в металл водорода с кислородом, связанным в малоустойчивые, восстанавливаемые водородом оксиды); хрупкость, обусловленная образованием хрупких гидридов при взаимодействии водорода с металлами III и IVA подгрупп; водородная коррозия сталей (взаимодействие водорода с углеродом стали с образованием метана высокого давления, последующим обезуглероживанием и межкристаллитным растрескиванием). Для ВОХВ характерным является начало развития при достаточно высоких давлениях водорода и температурах выше некоторого предела, а также наличие инкубационного периода, в течение которого оно не проявляется.

Для изучения ВОХВ КМ применяются стандартные оборудование и методы механических испытаний образцов, предварительно выдержанных в течение определенного времени в среде водорода при высоких давлениях и температурах.

## Методы изучения ВО КМ, вызванного растворенным водородом

Для изучения этого вида ВО КМ, как и в предыдущем случае, применяются стандартные оборудование и методы механических испытаний предварительно наводороженных образцов.

Наводороживание может осуществляться разными способами, как правило, применяют выдержку образцов в течение определенного времени ( $t_H$ ) в среде водорода при высоких давлениях ( $P_H$ ) и температурах ( $T_H$ ). Равновесная концентрация водорода в КМ при данных  $P_H$  и  $T_H$ , определяется уравнением:

$$S_{H_2} = S_0 e^{\frac{-H_s}{RT_H}} \sqrt{P_H}, \quad (3)$$

где  $S_0$  – константа,  $H_s$  – энергия активации растворимости,  $R$  – универсальная газовая постоянная. Из (3) следует, что необходимая концентрация водорода в образцах может быть получена при температурах ниже  $T_H$  подбором давления выше  $P_H$  (и наоборот).

Для примера в табл. 1 приведены значения  $S_{H_2}$  для аустенитной стали 12X18H10T при температуре 400 °С в интервале давлений 0,4–160 МПа, как рассчитанные на основании данных работы [5], так и полученные экспериментально на анализаторе ОН 900 фирмы «ELTRA» методом плавления в токе инертного газа-носителя [6]. Для сравнения в этой же таблице представлены экспериментально определенные значения равновесной растворимости водорода в мартенситной стали 14X17H2-Ш. Как видно из таблицы количество водорода, поглощенного сталью, зависит от ее структуры – в аустените растворяется значительно больше водорода, чем в мартенсите.

Таблица 1

Равновесная растворимость водорода в сталях 12Х18Н10Т и 14Х17Н2-Ш при температуре 400 °С в зависимости от давления наводороживания

	Давление наводороживания (МПа)					
	0,4	2,5	10	40	90	160
Растворимость водорода $S_{H_2}$ (ppm) в стали 12Х18Н10Т						
Расчет по данным работы [5]*	10	25	50	100	150	200
Эксперимент**	9,4	24	48	90	150	230
Сталь 14Х17Н2-Ш						
$S_{H_2}$ (ppm), эксперимент**	2,5	4,6	6,7	13	21,4	–
Относительное сужение после разрыва, $\psi$ (%), (см. рис. 1)	67	66	34,2	8,1	7,4	–

\* – расчет выполнен сотрудником РФЯЦ-ВНИИЭФ И. Л. Малковым;

\*\* – данные получены сотрудником РФЯЦ-ВНИИЭФ И. П. Максимкиным.

В табл. 1 и на рис. 1 приведена зависимость относительного сужения стали 14Х17Н2-Ш при комнатной температуре от концентрации водорода в образцах, наводороженных при температуре 400 °С. На рис. 1 хорошо видны две особенности, характерные для ВВО: наличие критической концентрации водорода, ниже которой ВВО не проявляется и при концентрациях выше критической охрупчивание стали усиливается с увеличением содержания водорода.

Следует отметить, что важным параметром процесса наводороживания образцов является время выдержки в среде водорода, которое должно быть больше времени достижения равновесной концентрации водорода по всему сечению образца ( $t_H > t_{\text{равн}}$ ). Величина  $t_{\text{равн}}$  зависит от коэффициента диффузии водорода в данном КМ (и соответственно от температуры), а также от геометрии образца и определяется расчетным способом. Например, для цилиндрического образца радиусом  $r$  временная зависимость средней концентрации диффундирующего вещества  $\bar{S}$  при наличии на поверхности источника с концентрацией  $S_{H_2}$  описывается выражением [7]:

$$\bar{S} = S_{H_2} \left( 1 - \frac{4}{r^2} \sum_1^{\infty} \frac{1}{\alpha_n^2} \exp(-D(T_H) \alpha_n^2 t) \right), \quad (4)$$

где  $\alpha_n$  –  $n$ -корень уравнения  $J_0(\alpha_n r) = 0$  ( $J_0$  – бесселева функция первого рода, нулевого порядка),  $D(T_H)$  – коэффициент диффузии. В качестве  $t = t_{\text{равн}}$  принимается расчетное время наводороживания, при котором в выражении (4)  $\bar{S} \approx S_{H_2}$ . Для примера на рис. 2 приведены временные зависимости средней концентрации водорода в цилиндрическом ( $\varnothing 4$  мм) образце из стали 12Х18Н10Т при температурах 400 и 700 °С, рассчитанные согласно (4) для  $D(T_H)$ , взятого из работы [5].

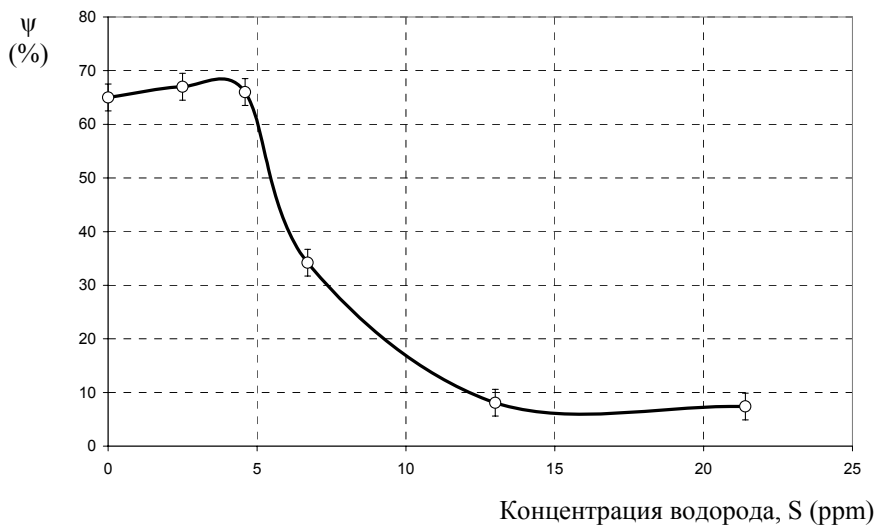


Рис. 1. Зависимость относительного сужения ( $\psi$ ) стали 14X17H2-III от концентрации растворенного в ней водорода

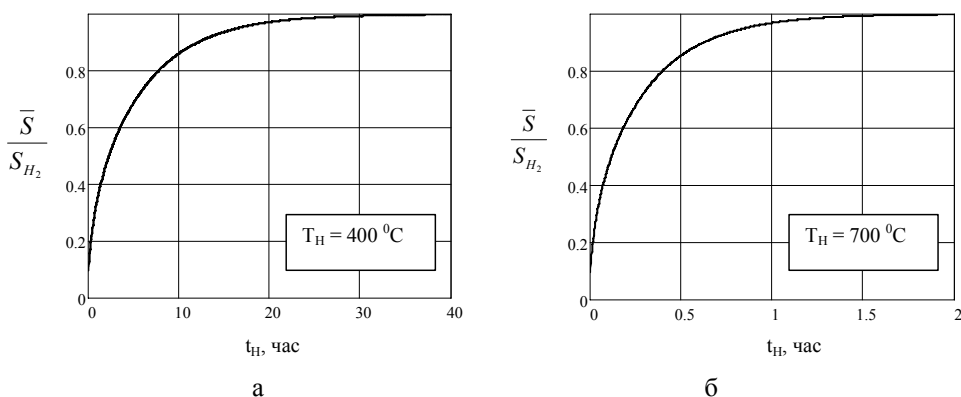


Рис. 2. Расчетные зависимости средней концентрации водорода в цилиндрическом ( $\varnothing 4$  мм) образце из стали 12X18H10T от времени наводороживания при температурах а) 400 °C; б) 700 °C

## Методы механических испытаний КМ в среде водорода

Очевидным основным отличием методов механических испытаний КМ при оценке их стойкости к ВОГС от методов изучения ВОХВ и ВВО является обязательное проведение испытаний образцов в среде водорода. Это отличие усложняет проведение испытаний и требует решения ряда проблем: обеспечения чистоты водорода; оборудования для компримирования (сжатия) водорода до высоких давлений; газовой арматуры и средств измерения давления; оборудования для вакуумирования газовых коммуникаций; разработки испытательных установок или дооснащение стандартных установок камерами вы-

сокого давления, подвижными и неподвижными уплотнениями захватов, электроводами проводов нагревательных и измерительных устройств и т. д. Рассмотрим основные проблемы, которые возникают при проведении механических испытаний в среде водорода.

*Чистота водорода.* Отмечено [8], что примеси в водороде кислорода, двуокиси серы, окиси углерода, сероуглерода очень эффективно ослабляют ВОГС, тормозящее действие двуокиси углерода более умеренное, азот и инертные газы не оказывают влияния на ВОГС. По вопросу о максимальных допустимых концентрациях примесей в водороде мнения расходятся. Например, в работе [9] указывается, что замедление ВОГС становится заметным при содержании кислорода свыше 0,1 ppm ( $10^{-5}$  % об.). Другие авторы [10] отмечают, что ВОГС высокопрочных сталей не замедляется при содержании в водороде менее 200 ppm ( $2 \times 10^{-2}$  % об.) кислорода. Такое расхождение, по-видимому, объясняется тем, что замедляющее ВОГС влияние кислорода зависит от его парциального давления, а не от общего давления смеси и это влияние по-разному проявляется для различных материалов [11].

Опыт работ во РФЯЦ-ВНИИЭФ показал, что для изучения ВОГС КМ чистоты баллонного водорода марки А (ГОСТ 3022-80), – 99,99 %, вполне достаточно. В случае особой необходимости можно применять очистку водорода с помощью диффузионных палладиевых фильтров [12].

*Оборудование для компримирования водорода.* Для сжатия водорода до необходимого давления используются поршневые и мембранные компрессоры гидравлического и негидравлического типов, мультипликаторы, металлгидридные источники. Такое оборудование должно быть изготовлено из водородостойких материалов. В РФЯЦ-ВНИИЭФ для сжатия водорода до 500 МПа применяются установки, подробно описанные в работе [13], а также используются источники водорода на основе гидроксида ванадия [14].

*Методы испытаний на несущую способность трубчатых образцов или мембран (дисков).* Эти методы сводятся к проведению сравнительных испытаний трубчатых или мембранных образцов на несущую способность давлением водорода и инертного газа. Наиболее простые варианты проведения испытаний при комнатной температуре представлены в работах [10, 15]. Пожаробезопасное исполнение технологической оснастки для испытаний при температурах 20–800 °С, применяемое в РФЯЦ-ВНИИЭФ, описано в [13]. Преимущество этих методов в том, что при испытаниях не требуются камер высокого давления и специальных испытательных установок, а только простая технологическая оснастка для герметизации образцов и подвода водорода. Кроме того, осесимметричное напряженно-деформированное состояние образцов позволяет моделировать влияние водорода при предельном состоянии элементов конструкций. Их недостатками являются: оценка ВОГС КМ производится только по одной характеристике – пределу прочности образцов (давлению разрушения или максимальному эквивалентному напряжению), а это не самая чувствительная к воздействию водорода характеристика (будет рассмотрено ниже); максимальные напряжения в упругой области нагружения находятся на внутренней поверхности трубчатого образца, а при разрушении на внешней (не контактирующей с водородом); на внутреннюю поверхность трубчатых образцов сложно наносить надрезы, трещины, покрытия.

*Методы испытаний на растяжение в среде водорода.* Простой метод проведения испытаний на растяжение в среде водорода приведен в работе [10] и состоит в следующем – средняя часть цилиндрического образца находится внутри небольшой испытательной камеры, а выступающие концевые части образца уплотняются при помощи подвижных уплотнений. Выступающие из камеры части образца закрепляются в захватах разрывной машины. Аналогичного типа устройства и приспособления для оснащения разрывных машин возможностью проведения испытаний в газовых средах высокого давления разработаны рядом авторов. Одно из таких типичных устройств приведено в работе [16]. В этой конструкции неподвижная тяга совмещена с крышкой, герметично установленной с одной стороны цилиндрической камеры высокого давления при помощи металлической прокладки. С другой стороны камеры при помощи подвижного уплотнения с водяным охлаждением в нее вводится активная тяга. Тяги устанавливаются в захваты разрывной машины.

Приведенные в литературе установки и приспособления для испытаний образцов на растяжение в среде водорода отличаются по типу нагружающего устройства, конструкции испытательной камеры высокого давления и элементов ее герметизации, расположению нагревательного устройства и т. д. Эти отличия вызваны удобством для разработчика, различным выбором общепринятых подходов при конструировании и, вообще говоря, не принципиальны. Однако есть общая принципиальная проблема, с которой сталкиваются разработчики таких установок. Описанные выше устройства имеют существенный недостаток, – динамометр разрывной машины при испытаниях измеряет не только растягивающую нагрузку на образце  $Q_{обр}$ , но также сжимающую силу  $Q_{давл}$  из-за воздействия высокого давления, которое выталкивает активную тягу из камеры (величина давления газа  $\times$  площадь поперечного сечения активной тяги) и растягивающую силу трения  $Q_{тр}$  в подвижном уплотнении. Причем по величине сила  $Q_{давл}$  может значительно превышать  $Q_{обр}$ . Например, если максимальная нагрузка  $Q_{обр}$  при растяжении цилиндрического образца  $\varnothing 3$  мм из стали 12X18H10T составляет порядка 4000 Н, то при давлении газа в камере 80 МПа и площади поперечного сечения активного захвата  $F_{захв} \approx 2,5 \text{ см}^2$  (для диаметра 18 мм) сила  $Q_{давл} \approx 20000$  Н (в 5 раз больше). Кроме того, в процессе испытаний при перемещении активного захвата свободный объем в камере будет увеличиваться, что приведет к падению давления в камере и уменьшению величины  $Q_{давл}$ . Что касается  $Q_{тр}$ , то авторы обычно утверждают, что она в процессе растяжения образца сохраняется постоянной и ее можно учесть при испытаниях. Однако очевидно, что измерять  $Q_{тр}$  и гарантировать ее постоянство в течение всего испытания невозможно.

Некоторые авторы пытались решать эту проблему для повышения точности измерения растягивающей силы на образце. Например, в работах [15, 17, 18] погрешность измерения усилия, вызванная трением в сальниковом уплотнении активной тяги, устранялась введением динамометра внутрь камеры и изолированием его от воздействия водорода. Это привело к увеличению размеров и массы испытательной камеры, и, как следствие, к необходимости размещения устройства для нагревания образца также внутри камеры. Такое решение потребовало дополнительных герметичных электровыводов нагре-

вательного устройства и термопары. В работе [19] с целью компенсации усилия  $Q_{\text{давл}}$ , над рычагом силоизмерителя разрывной машины с подвешенной испытательной камерой размещался компенсатор давления, пневматически связанный с камерой. Компенсатор представляет собой герметичную емкость с подвижным штоком. Шток компенсатора и подвижная тяга имеют одинаковое поперечное сечение. При этих условиях усилие  $Q_{\text{давл}}$ , действующее на рычаг силоизмерителя с одной стороны, автоматически компенсируется обратным действием штока компенсатора, а силоизмерительный механизм регистрирует только нагрузку на образце, вес камеры и силу трения в уплотнении подвижной тяги.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ для испытаний стандартных ( $\varnothing$  3 мм, тип IV, № 9, ГОСТ1497-84) цилиндрических образцов КМ на растяжение в среде водорода разработаны две установки. Одна установка [13] предназначена для испытаний в водороде при давлениях 50–150 МПа и температурах 20–800 °С, имеет гидравлический привод, нагружение образца осуществляется за счет давления газа в рабочей камере ( $Q_{\text{давл}}$ ). Вторая установка [20] собрана на базе разрывной машины UTS100K и предназначена для растяжения образцов в газовых средах при давлениях от  $10^{-3}$  мм рт. ст. до 70 МПа в интервале температур  $-150 - +300$  °С при скоростях деформирования до 500 мм/мин.

Обе установки оснащены специально разработанным тензометрическим датчиком силы, входящим в состав подвижной тяги и расположенным за пределами испытательной камеры. Разработанный датчик измеряет только нагрузку на образце независимо от величины давления газа в камере и силы трения. Конструкция датчика представлена в работе [20].

Следует отметить, что метод испытаний на растяжение в среде водорода имеет преимущество перед испытаниями трубчатых образцов на несущую способность давлением водорода, так как позволяет оценивать влияние водорода не только на предел прочности материала, но и на характеристики пластичности – относительное удлинение после разрыва ( $\delta$ ) и относительное сужение ( $\psi$ ). А характеристики пластичности, как правило, более чувствительны к воздействию водорода, чем прочностные характеристики. Кроме того, испытаниям на растяжение в среде водорода можно подвергать не только гладкие образцы, но также и цилиндрические образцы с кольцевым надрезом или кольцевой трещиной.

Другие методы механических испытаний в среде водорода. В литературных источниках описываются конструкции установок и методов, разработанных не только для испытаний на растяжение, но и для определения других характеристик механических свойств КМ в среде водорода. Например, для проведения испытаний образцов КМ в водороде: для исследования малоциклового усталости [10, 15, 18]; на многоцикловую усталость [10, 15, 18]; на изгиб [10]; на длительную прочность и ползучесть [15, 18, 19]; на вязкость разрушения [10, 18]; для исследования характеристик трения [15] и т. д. Конструкции этих установок, как и описанных выше установок для растяжения образцов в среде водорода, состоят из общих функциональных узлов: нагружающего устройства; камеры высокого давления и элементов ее герметизации; неподвижной и подвижной тяги; подвижного уплотнения активной тяги;



силоизмерителя и датчика перемещения; устройства нагрева или охлаждения образца. Установки разных авторов отличаются лишь конструктивным исполнением этих функциональных узлов, и в рамках данной работы не будем подробно рассматривать такие отличия.

### **Факторы, влияющие на выбор методов при исследовании ВОГС КМ**

При выборе методов испытаний следует сделать предварительную оценку водородостойкости КМ, а также учитывать чувствительность различных методов испытаний при оценке стойкости КМ к ВОГС и зависимость степени охрупчивания материалов от условий испытаний.

*Категории КМ по степени охрупчивания водородом.* Фактическая стойкость КМ к ВОГС определяется экспериментально. Однако к настоящему времени накоплен большой экспериментальный опыт по исследованию различных КМ, который позволяет сделать предварительный прогноз по влиянию водорода на механические свойства материала. Авторы работы [10] предложили условно разбить все КМ по стойкости к ВОГС на четыре категории, а в работе [21] предложен количественный критерий такого разбиения КМ на:

- экстремально охрупчиваемые –  $\beta_1 < 0,5$ ;
- сильно охрупчиваемые –  $0,5 < \beta_1 < 0,75$ ;
- слабо охрупчиваемые –  $0,7 < \beta_1 < 0,9$ ;
- незначительно охрупчиваемые –  $\beta_1 > 0,9$ .

К незначительно и слабо охрупчиваемым материалам относятся хромоникельмарганцовистые стали со стабильной аустенитной структурой; сплавы на Fe-Ni основе, с содержанием никеля 25–45 %; не упрочненные термической обработкой алюминиевые сплавы со структурой твердого раствора; медь и ее сплавы с серебром и хромом. Стали со структурой метастабильного аустенита; аустенитные с интерметаллидным упрочнением; группа сплавов на Ni-основе, содержащих более 50 % Ni и около 5 % элементов упрочнителей (структура  $\gamma+\gamma'$ ); бериллиевые бронзы относятся к слабоохрупчиваемым. Мартенситостареющие, мартенситные, аустенитно-мартенситные попадают в категорию сильно охрупчиваемых.

*Чувствительность различных методов испытаний при оценке стойкости КМ к ВОГС.* При выборе методов испытаний для оценки водородостойкости КМ надо учитывать различную чувствительность этих методов к ВОГС. На рис. 3 приведено сравнение (показатель  $\beta_1$ ) для различных характеристик механических свойств сплава инконель 718 в водороде и гелии при давлении 35 МПа, представленное в работе [22]. Из рис. 3 видно, что наиболее сильное влияние воздействие водорода оказывает на мало- и многоцикловую выносливость, а также на относительное сужение после разрыва надрезанных и гладких образцов. Наименьшее влияние воздействие водорода оказало на временное сопротивление.

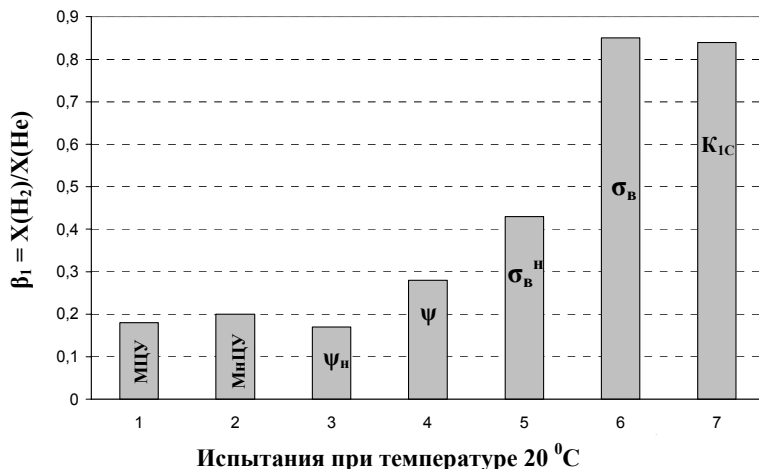


Рис. 3. Сравнение механических свойств сплава инконель 718 в водороде и гелии при давлении 35 МПа [22]: 1 (МЦУ) – малоцикловая усталость, деформация 1–2 %; 2 (МнЦУ) – многоцикловая усталость,  $R = 0,1$ ; 3 ( $\psi_H$ ) и 5 ( $\sigma_B^H$ ) – относительное сужение и временное сопротивление надрезанных образцов ( $K_t = 8$ ), соответственно

Сравнение, приведенное на рис. 3, типично для ВОГС, но справедливо не всегда и зависит от материала и условий испытаний (прежде всего от температуры и скорости деформации при испытаниях). Например, в работе [15] отмечается, что при высоких скоростях деформирования и низких давлениях водорода сильнее охрупчиваются гладкие образцы, а в более жестких условиях (низкие скорости деформирования и высокие давления) – образцы с концентратором напряжений.

Следует отметить еще один интересный момент. Как видно из рис. 3, наименьшее влияние воздействие водорода оказало на временное сопротивление. Даже при практически полной потере пластичности при воздействии водорода у экстремально охрупчиваемых сталей предел прочности образцов остается на достаточно высоком уровне. Как видно из табл. 2, при почти полном охрупчивании стали 14X17H2-Ш в среде водорода, предел прочности образцов уменьшился всего на 22 %. В табл. 2 также приведены величины давления разрушения ( $P_p$ ) трубчатых образцов из этой стали, испытанных на несущую способность гелием и водородом. Можно отметить хорошее совпадение показателей  $\beta_1$  ( $\sigma_B$ )  $\approx \beta_1$  ( $P_p$ )  $\approx 0,8$ . То есть, как отмечалось выше, метод испытаний на несущую способность трубчатых образцов не обладает высокой чувствительностью к ВОГС (как и характеристика  $\sigma_B$ ).

*Влияние условий испытаний на степень ВОГС КМ.* При оценке стойкости КМ к ВОГС обычно выбираются режимы испытаний, соответствующие условиям работы конкретной конструкции, либо такие режимы, при которых влияние водорода на механические свойства материалов проявлялись в максимальной степени. В общем случае степень ВОГС КМ зависит от скорости деформации, давления водорода и температуры.

Таблица 2

Влияние водорода на некоторые характеристики механических свойств стали 14X17H2-Ш при комнатной температуре.

Среда	Характеристики механических свойств			
	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$\psi$	$P_p^*$
	МПа		%	МПа
He, 80 МПа	1390	1120	70	190
H <sub>2</sub> , 80 МПа	1090	—**	4	152
$\beta_1$	0,78	—	0,06	0,8

\* – давление разрушения трубчатых образцов при их испытании на несущую способность гелием и водородом;

\*\* – образцы в водороде разрушились на упругом участке разрушения при напряжении на  $\approx 3\%$  меньше, чем  $\sigma_{0,2}$  в гелии.

В ряде работ отмечается, что степень ВОГС КМ повышается с уменьшением скорости деформации. Например, в работе [15] отмечается, что ВОГС стали 12X18H10T наиболее сильно проявляется при скоростях деформации  $10^{-6} - 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  и с повышением скорости нагружения убывает до практически полного устранения в диапазоне скоростей свыше  $\sim 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Также в работах многих авторов [например, 15, 23] указывается на влияние величины давления водорода на степень охрупчивания материалов – в общем случае с повышением давления водорода степень ВО сталей усиливается. Например, для стали X18H10T в работе [15] указывается, что снижение ее пластичности, вызванное водородом, существенным образом зависит от давления водорода в диапазоне 0,1–35 МПа. Дальнейшее повышение давления водорода сколько-нибудь заметно не влияет на степень ВОГС этой стали.

В работе [1] отмечается, что охрупчивание сталей, сплавов на никелевой и железо-никелевой основе внешним водородом проявляется в интервале температур от  $-150$  до  $+300 \text{ }^\circ\text{C}$  с максимумом при комнатной температуре. В работе [15] показано, что в интервале температур от комнатной до плюс  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  максимальное влияние водорода на механические свойства стали X18H10T проявляется при комнатной температуре. С повышением температуры оно ослабевает и в области температур выше  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  полностью исчезает.

Такая температурная зависимость степени проявления ВОГС характерна для большинства КМ. Однако из этого правила есть исключения. Например, в интервале температур  $20-600 \text{ }^\circ\text{C}$  максимальное охрупчивающее воздействие водорода (при давлении 80 МПа) на сплав ХН40МДТЮ-ИД наблюдалось при температурах  $200-500 \text{ }^\circ\text{C}$  [24]. А при исследовании водородостойкости сплава ЭП741НП в интервале температур  $20-840 \text{ }^\circ\text{C}$  максимальная степень ВОГС отмечена при  $460 \text{ }^\circ\text{C}$  [25]. Также следует отметить, что при различной скорости деформации температурный интервал, в котором происходит охрупчивание КМ, тоже может изменяться [1].

## Выводы

Рассмотрены методы механических испытаний, применяемые при исследовании стойкости КМ к различным видам водородного охрупчивания. Особенное внимание уделено методам изучения стойкости КМ к ВОГС. Представлены конструкции и устройство установок для проведения механических испытаний материалов в среде водорода. Проведено сравнение чувствительности различных методов при оценке стойкости КМ к ВОГС и степени влияния водорода на различные характеристики механических свойств. Представлены подходы и испытательные установки, разработанные в РФЯЦ-ВНИИЭФ для исследования водородостойкости КМ.

## Список литературы

1. Колачев Б. А. Водородная хрупкость металлов. М.: Металлургия, 1985.
2. Колачев Б. А. // *Металловедение и термическая обработка*. 1999. Т. 23. С. 43–46.
3. Murrey A. M., Timmerhaus K. D. // *Advances in Cryogenic Engineering*. 1977. Vol. 22. P. 182–192.
4. Dutton R. // *J. Hydrogen Energy*. 1984, 9(1/2). P. 147–155.
5. Louthan M. R., Derrick R. G. Hydrogen transport in austenitic stainless steel // *Corrosion Science*. 1975. Vol. 15. P. 565–577.
6. Юхимчук А. А., Златоустовский С. В., Бабушкин П. Л., Polemitis Y. Установка для определения содержания газообразных компонентов в исследуемом образце: Патент РФ на полезную модель № 49273 // *Бюллетень изобретений и полезных моделей* № 31 от 10.11.2005.
7. Barrer R. M. *Diffusion in and through solids*. Cambridge, 1941.
8. Liu, H. W., Hu, Ya-lung, Fikalora, Catalytic P. J. Dissociation and Hydrogen Assisted Cracking // Paper presented at 1973 Western Metal and Tool Conference (WESTEC), 12–16 March 1973.
9. Hofmann W., Rauls W. // *Welding Journal*. 1965. Vol. 44. P. 225–230.
10. Chandler W. T., Walter R. J. Testing to Determine the Effect of High-Pressure Hydrogen Environments on the Mechanical Properties of Metals // *Hydrogen Embrittlement Testing, a symposium presented at the 75 Annual Meeting ASTM543, Los Angeles, Calif., 25–30 June 1972*. P. 170–190.
11. Шевнин Е. В., Бойцов И. Е., Michler Th. и др. Влияние добавки кислорода в водороде на стойкость сталей 1.1200 и 1.4301 к водородному охрупчиванию // *Сб. тезисов докладов Восьмой Международной школы молодых ученых и специалистов IHISM-12*. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012.
12. Клевцов В. Г., Лобанов В. Н., Хабаров Ю. А., Юхимчук А. А. Диффузионная очистка изотопов водорода палладиевыми фильтрами // *Сб. докл. «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами»*, Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002. С. 136–141.
13. Basunov A. V., Boitsov I. E., Grishechkin S. K. et al. Physical and mechanical properties of structural materials in gaseous media containing hydrogen isotopes // *J. Moscow Phys. Society*. 1999. Vol. 9, N 3. P. 237–243.

14. Голубков А. Н., Юхимчук А. А. Источники изотопов водорода высокого давления на основе гидрида ванадия // *Изотопы водорода. Фундаментальные и прикладные исследования*. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2009. С. 501.
15. Ткачев В. И., Холодный В. И., Левина И. Н. Работоспособность сталей и сплавов в среде водорода. Львов: «Вертикаль», 1999.
16. Гликман Л. А. и др. К испытаниям на растяжение в водороде и других коррозионных средах при высоких давлениях и температурах // *Заводская лаборатория*. 1965, № 5. С. 612–613.
17. Максимович Г. Г. и др. Высокотемпературные испытания на растяжение в газообразных средах высоких давлений // *Проблемы прочности*. 1984, № 9. С. 97.
18. Harris J. A., Wanderham Van M. C. Various Mechanical Tests Used to Determine the Susceptibility of Metals to High-Pressure Hydrogen // *Hydrogen Embrittlement Testing, a symposium presented at the 75 Annual Meeting ASTM543, Los Angeles, Calif., 25–30 June 1972*. P. 198–220.
19. Старинский В. Д. и др. Установки для механических испытаний в газообразном водороде // *ФХММ*. 1978, № 3. С. 98.
20. 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 плюс 300 °С // *Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM-08 JUNIOR: Сб. докл. Четвертой Международной школы молодых ученых и специалистов*. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. С. 280.
21. Бондаренко Т. В., Рачук В. С., Холодный В. И. Некоторые аспекты выбора и работоспособности конструкционных материалов, работающих в среде водорода в широком диапазоне температур и нагрузок // *Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM-07: Сб. докл. Третьей Международной школы молодых ученых и специалистов*. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008. С. 266.
22. Gray H. R. Testing for Hydrogen Environment Embrittlement: Experimental Variables // *Hydrogen Embrittlement Testing, a symposium presented at the 75 Annual Meeting ASTM543, Los Angeles, Calif., 25–30 June 1972*. P. 133–151.
23. Швед М. М. О методическом подходе к исследованию влияния водорода на свойства металлов // *ФХММ*. 1977, № 5. С. 71–74.
24. Бойцов И. Е., Гришечкин С. К., Златоустовский С. В., Юхимчук А. А. Моделирование влияния трития на механические свойства конструкционных материалов методом синергетического воздействия радиогенного  $^3\text{He}$  и водорода // *Физика и техника высоких плотностей энергии: Научное издание в 2-х выпусках. Выпуск 2*. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011.
25. Boitsov I. E. et al. Physical and mechanical characteristics of EP741 and EP99 high-temperature nickel alloys in high-pressure hydrogen gas // *International Journal of Hydrogen Energy*. 1999. Vol. 24. P. 919–926.