

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ И РАДИОГЕННОГО ^3He НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ СПЛАВА ХН40МДТЮ-ИД

*И. П. Максимкин, А. Ю. Баурин, И. Е. Бойцов, С. К. Гришечкин,
И. Л. Малков, Е. В. Шевнин, А. А. Юхимчук*

РФЯЦ – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики, г. Саров, Россия

В докладе представлены результаты исследования влияния водорода высокого давления (80 МПа), радиогенного ^3He и их совместного воздействия на механические свойства и структуру сплава ХН40МДТЮ-ИД в интервале температур от комнатной до 873 К.

Для исследования были подготовлены образцы с тремя различными концентрациями ^3He : ≈ 30 , ≈ 80 и ≈ 190 аppt (партии № 1, № 2 и № 3 соответственно). Нарботка ^3He осуществлялась методом «тритиевого треугольника».

Испытания при комнатной температуре показали, что в зависимости от увеличения концентрации ^3He происходит увеличение условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$) и снижение характеристик пластичности (относительного удлинения после разрыва δ_5 и относительного сужения после разрыва ψ). Однако, при температуре испытаний 873 К сплав с максимальным содержанием ^3He (партия № 3), оказался более пластичным, чем сплав из партий № 1 и № 2.

Введение

Исследование процессов взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами ведутся уже много лет, тем не менее, они не потеряли своей актуальности и в настоящее время.

Водород растворяется практически во всех сталях и сплавах. Поэтому вопрос водородной коррозии и хрупкого разрушения сплавов и сталей в настоящее время перерос в очень важную проблему водородной хрупкости конструкционных и высокопрочных сталей и сплавов на основе железа, никеля, титана и т. д.

При длительном контакте металлов и конструкционных материалов (КМ) с тритийсодержащими средами в них накапливается радиогенный ^3He , образующийся в результате радиоактивного распада трития, растворенного в металле. При этом наличие ^3He вызывает образование специфических дефектных структур.

В данной работе изложены результаты исследований влияния водорода и радиогенного гелия на механические свойства и структуру сплава ХН40МДТЮ-ИД в интервале температур от комнатной до 873 К. Данная работа является продолжением работы [1].

Методика испытаний

Исследования влияния водорода высокого давления (80 МПа), радиогенного ^3He и их совместного воздействия на механические свойства и структуру сплава ХН40МДТЮ-ИД проводились при температурах 293, и 873 К на стандартных цилиндрических образцах (тип IV, № 9 ГОСТ 1497-84) с диаметром рабочей части 3 мм и расчетной длиной 15 мм. Образцы изготавливались из аустенитного жаропрочного дисперсионно-твердеющего сплава ХН40МДТЮ-ИД. После изготовления образцы подвергались термообработке по режиму: старение при 873–903 К в течение 5–8 ч, охлаждение на воздухе. Химический состав сплава приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сплава ХН40МДТЮ-ИД (массовая доля элементов, %)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Al	Mo	Cu	S	P	Fe
≤ 0,04	≤ 0,5	≤ 0,8	14–17	39–42	2,5–3,2	0,7–1,2	4,5–6,0	2,7–3,3	≤ 0,02	≤ 0,035	ост.

Для накопления ^3He в образцах был использован метод «тритиевого трюка» [2]. Образцы тритировались при давлении трития ≈ 50 МПа и температуре ≈ 770 К. После чего контейнер с образцами охлаждался, вакуумировался, и выдерживался в течении времени, соответствующего для наработки требуемой концентрации ^3He . Затем образцы подвергались процессу детритизации. Удаление трития до радиационно-безопасной концентрации проводилось методом высоковакуумной термодесорбции и методом изотопного замещения трития протием.

Описание установки для испытаний на растяжение образцов в газовых средах высокого давления – ее устройство, технические характеристики, методика и погрешности измерений – представлено в работе [4]. Определялись следующие характеристики сплава: $\sigma_{\text{в}}$ – временное сопротивление; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести; δ_5 – относительное удлинение после разрыва; ψ – относительное сужение после разрыва. Каждая характеристика получена по результатам испытаний двух образцов в аналогичных условиях.

Влияние радиогенного ^3He исследовалось по результатам растяжения образцов, содержащих ^3He , в инертной среде при давлении ~ 80 МПа.

Для исследования совместного воздействия водорода и радиогенного ^3He на механические свойства сплава, испытания на растяжение проводились в среде водорода при давлении 80 МПа. Перед испытаниями на растяжение в среде водорода образцы подвергались предварительному наводороживанию до предельной равновесной концентрации, соответствующей каждой испытательной температуре. Таким образом оценивалась чувствительность механических свойств сплава к воздействию как внутреннего (растворенного), так и внешнего водорода. Наводороживание образцов проводилось путем их выдержки под давлением водорода

при температуре 773 К в течение трех часов. Необходимая концентрация водорода в образцах для заданных условий испытаний достигалась различным давлением водорода при наводороживании. Десорбция водорода из образцов после завершения процесса наводороживания предотвращалась быстрым охлаждением контейнеров (их погружали в воду). Время остывания контейнеров с образцами до комнатной температуры составляло менее 1 мин.

Расчетная равновесная концентрация водорода для каждой испытательной температуры и соответствующая величина давления водорода при предварительном наводороживании определялись по формулам (1) и (2), соответственно [1].

$$S(T) = S_0 \sqrt{P_{\text{исп}}} e^{-\frac{H_s}{RT_{\text{исп}}}}, \quad (1)$$

где $S_0 = 6,6 \text{ см}^3 \cdot \text{Н}_2/\text{см}^3 \cdot \text{Ме} \cdot \text{ати}^{1/2}$ – константа растворимости; $P_{\text{исп}} = 80 \text{ МПа}$ – давление водорода при испытаниях на растяжение; $H_s = 12875 \text{ Дж/г} \cdot \text{ат}$ – теплота растворения; $T_{\text{исп}} = 293, 573, \text{ и } 873 \text{ К}$ – температуры испытаний; $R = 8,31 \text{ Дж/К} \cdot \text{моль}$ – универсальная газовая постоянная. Выражение для давления наводороживания получали из преобразования формулы (1):

$$P_{\text{навод}} = \left(\frac{S(T)}{S_0} e^{\frac{H_s}{RT_{\text{навод}}}} \right)^2, \quad (2)$$

где $T_{\text{навод}} = 773 \text{ К}$ – температура при наводороживании образцов.

После проведения испытаний на растяжение определялось фактическое содержание в образцах радиогенного ^3He . Определение фактического содержания ^3He в образцах проводилось методом плавления образца в потоке инертного газа-носителя с помощью модернизированного газоанализатора [3]. Для этого от рабочей части обломков образца отрезались пробы длиной $\sim 5 \text{ мм}$.

Фактическое содержание радиогенного ^3He , экспериментально определенное на пяти пробах, составило $\approx 30, \approx 80$ и $\approx 190 \text{ аррм}$ для партий № 1, № 2 и № 3 соответственно.

Результаты испытаний

В табл. 2 представлены результаты испытаний на растяжение образцов из партий № 1, № 2 и № 3 в инертной среде при давлении 80 МПа и при комнатной температуре. Результаты растяжений исходных образцов и образцов из партии № 3 были получены ранее [1].

Таблица 2

Характеристики механических свойств сплава ХН40МДТЮ-ИД, полученные при испытаниях в инертной среде и при комнатной температуре

Характеристики	Исходные образцы	Партия № 1 ($C_{3\text{He}} \approx 30$ appm)	Партия № 2 ($C_{3\text{He}} \approx 80$ appm)	Партия № 3 ($C_{3\text{He}} \approx 190$ appm)
$\sigma_{\text{в}}^*$	1170	1210	1220	1170
$\sigma_{0,2}^*$	760	800	810	830
δ_5	36,9	36,9	32,5	25,9
ψ	58,2	45,2	39,1	38,2

* – значения округлены до 10 МПа.

На рис. 1 представлены характеристики пластичности образцов партии № 1, № 2 и № 3.

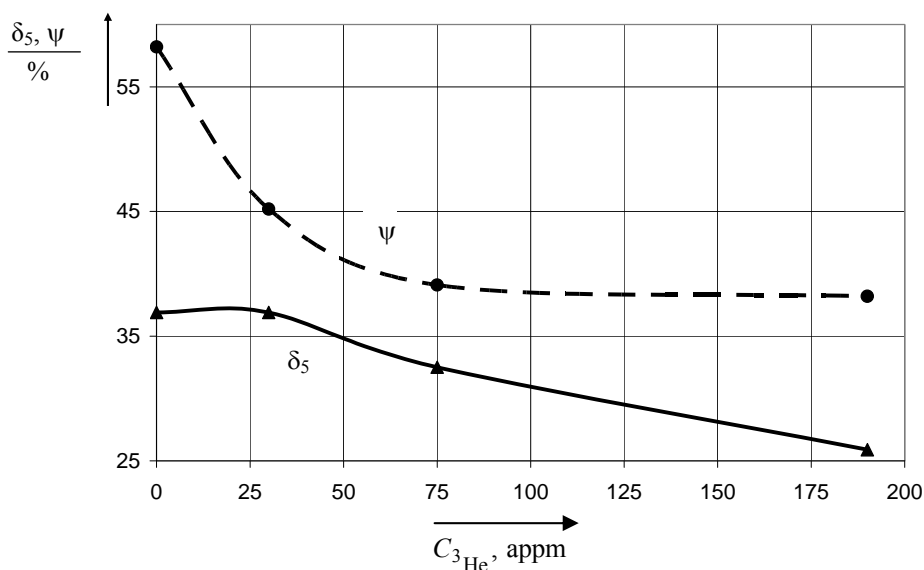


Рис. 1. Характеристики пластичности (δ_5 , ψ) сплава ХН40МДТЮ-ИД после испытаний в инертной среде при комнатной температуре в зависимости от концентрации ^3He

Из данного рисунка видно, что с увеличением концентрации ^3He при испытаниях при комнатной температуре в инертной среде происходит заметное снижение характеристик пластичности исследуемого сплава. Максимальное снижение характеристик пластичности наблюдается у образцов из партии № 3 и составляет ≈ 30 и ≈ 34 % для относительного удлинения и относительного сужения после разрыва соответственно.

На рис. 2 представлена зависимость условного предела текучести сплава ХН40МДТЮ-ИД ($\sigma_{0,2}$) от концентрации ^3He , полученная по результатам растяжения образцов в инертной среде при комнатной температуре.

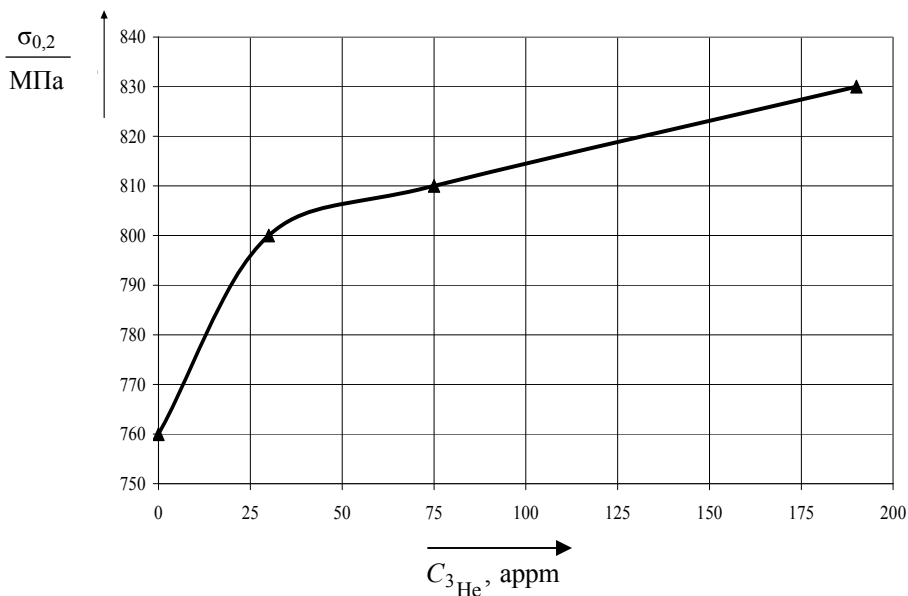


Рис. 2. Зависимость условного предела текучести сплава ХН40МДТЮ-ИД ($\sigma_{0,2}$) от концентрации ^3He , полученная по результатам растяжения образцов в инертной среде при комнатной температуре

Из рис. 2 видно, что введение в сплав ^3He вызывает увеличение условного предела текучести сплава ХН40МДТЮ-ИД ($\sigma_{0,2}$) и максимальное увеличение данной характеристики $\approx 9,2\%$ наблюдается у образцов из партии № 3 (с максимальной концентрацией ^3He).

В ранее проведенных исследованиях [5] на образцах из сплава ХН40МДТЮ-ИД с содержанием 140 аррм ^3He было показано, что максимальное совместное воздействие водорода и радиогенного ^3He на механические свойства данного сплава проявляется при температуре 873 К. Так как количество образцов из партий № 1 и № 2 было ограничено, то было принято решение провести испытания на растяжение образцов из данных партий при температуре 873 К в атмосфере водорода и инертного газа. Результаты проведенных испытаний представлены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики механических свойств сплава ХН40МДТЮ-ИД, полученные при испытаниях в инертной среде и в среде водорода при температуре 873 К

Характеристики	Партия № 1 ($C_{3\text{He}} \approx 30 \text{ аррм}$)		Партия № 2 ($C_{3\text{He}} \approx 80 \text{ аррм}$)		Партия № 3 ($C_{3\text{He}} \approx 190 \text{ аррм}$)	
	Испытательная среда					
	He	H ₂	He	H ₂	He	H ₂
$\sigma_{\text{в}}^*$	990	970	1000	970	980	990
$\sigma_{0,2}^*$	690	700	700	700	700	710

Окончание табл. 3

Характеристики	Партия № 1 ($C_{3\text{He}} \approx 30$ appm)		Партия № 2 ($C_{3\text{He}} \approx 80$ appm)		Партия № 3 ($C_{3\text{He}} \approx 190$ appm)	
	Испытательная среда					
	He	H ₂	He	H ₂	He	H ₂
δ_5	22,1	**	19,8	14,7	25,8	21,5
ψ	29,1	19,1	23,9	18,2	36,5	27,8

* – значения округлены до 10 МПа; ** – образец порвался за меткой, определить характеристику не удалось.

Из данной таблицы видно, что при температуре испытаний 873 К не наблюдается заметное воздействие водорода и ^3He на прочностные характеристики сплава ХН40МДТЮ-ИД. Однако, для характеристик пластичности проявился совершенно иной эффект. Материал с максимальной концентрацией ^3He (партия № 3) оказался наиболее пластичными при данной температуре при испытаниях как в среде водорода так и в среде инертного газа.

На рис. 3 графически представлена зависимость характеристик пластичности сплава ХН40МДТЮ-ИД от концентрации ^3He при температуре испытаний 873 К.

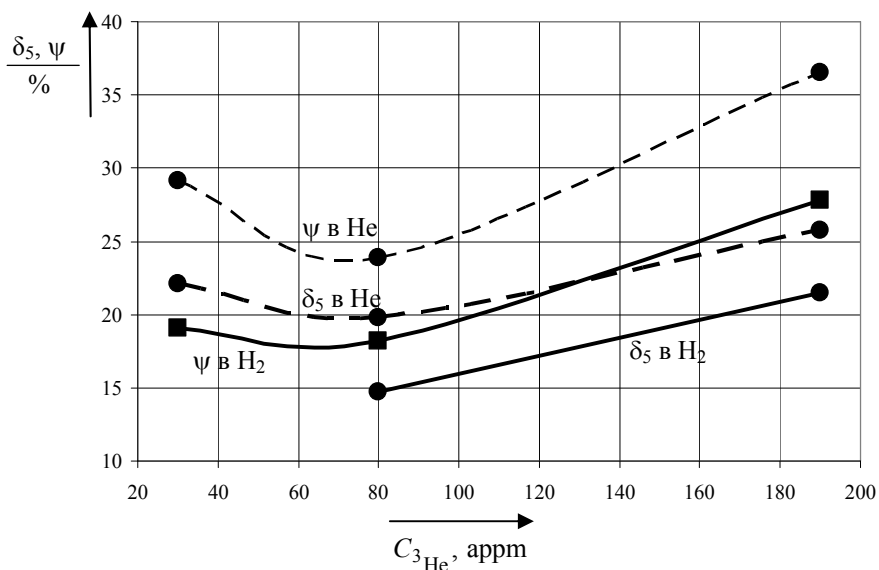


Рис. 3. Характеристики пластичности (δ_5 , ψ) сплава ХН40МДТЮ-ИД после испытаний в инертной среде и в среде водорода при температуре 873 К в зависимости от концентрации ^3He

Выводы

В данной работе приведены результаты испытания на растяжение стандартных цилиндрических образцов из сплава ХН40МДТЮ-ИД с различными концентрациями ^3He .

В ходе проведенных исследований было получено, что с увеличением концентрации ^3He при испытаниях при комнатной температуре в инертной среде происходит заметное снижение характеристик пластичности исследуемого сплава. Максимальное снижение характеристик пластичности проявилось у образцов из партии № 3 и составляет ≈ 30 и ≈ 34 % для относительно удлинения и относительного сужения после разрыва, соответственно. Так же в зависимости от концентрации ^3He происходит увеличение условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$) сплава ХН40МДТЮ-ИД и максимальное увеличение данной характеристики $\approx 9,2$ % наблюдается у образцов из партии № 3 (с максимальной концентрацией ^3He).

В результате испытаний на растяжение при температуре 873 К видна совершенно иная картина. Различие концентраций радиогенного ^3He не оказало заметного воздействия на прочностные характеристики исследуемого сплава. Материал с максимальной концентрацией ^3He (партия № 3) оказался более пластичными по сравнению с материалом из партий № 1 и № 2.

Из сравнения результатов испытаний в инертной среде и в среде водорода видно, что в среде водорода охрупчивание сплава усиливается.

Список литературы

1. Максимкин И. П., Баурин А. Ю., Бойцов И. Е., Гришечкин С. К. и др. Влияние водорода и радиогенного ^3He на механические свойства сплава ХН40МДТЮ-ИД // Сб. докладов Пятой Международной школы молодых ученых и специалистов «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами ИИЗМ'09». Саров, 5–10 июля 2009 года.
2. Malkov I. L., Klevtsov V. G., Yukhimchuk A. A. Application of the «tritium trick» technique for rapid accumulation of helium-3 in structural materials // *Material science*. 2002, N 5. P. 34–37.
3. 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.
4. Basunov A. V., Boitsov I. E., Grishechkin S. K., Ismagilov V. Z. 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.
5. Boitsov I. E., Grishechkin S. K., Zlatoustovskiy S. V., Yukhimchuk A. A. «Modeling of the tritium impact on mechanical properties of structural materials by radiogenic helium and hydrogen synergetic effect technique». *Fusion Science and Technology*. 2005. Vol. 48. P. 609.