

## ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА И РАДИОГЕННОГО $^3\text{He}$ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА ХН40МДТЮ-ИД

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

РФЯЦ-Всероссийский НИИ Экспериментальной Физики

*В статье представлены результаты исследования влияния водорода высокого давления (80 МПа), радиогенного  $^3\text{He}$  (концентрация  $\sim 190$  арт) и их совместного воздействия на механические свойства сплава ХН40МДТЮ-ИД в интервале температур от комнатной до 873 К. Показано, что наличие  $^3\text{He}$  приводит к существенному снижению пластических свойств сплава, не оказывая при этом значительного воздействия на прочностные характеристики. В среде водорода охрупчивание сплава, содержащего  $^3\text{He}$ , еще более усиливается.*

### Введение

При длительном контакте металлов и конструкционных материалов (КМ) с тритийсодержащими средами в них накапливается радиогенный  $^3\text{He}$ , образующийся в результате радиоактивного распада трития, растворенного в металле. При этом помимо водородного охрупчивания добавляется образование специфических дефектных структур, вызванное наличием  $^3\text{He}$ .

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

### Методика испытаний

Исследования влияния водорода высокого давления (80 МПа), радиогенного  $^3\text{He}$  и их совместного воздействия на механические свойства сплава ХН40МДТЮ-ИД проводились при температурах 293, 573, 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	S	P	Cr	Ni	Mo	Ti	Al	Cu
≤ 0,04	≤ 0,5	≤ 0,8	≤ 0,02	≤ 0,035	14–17	39–42	4,5–6	2,5–3,2	0,7–1,2	2,7–3,3

Для накопления  $^3\text{He}$  в образцах был использован метод "тритиевого трюка" [2]. Образцы тритировались при давлении трития  $\approx 50$  МПа и температуре  $\approx 770$  К. После чего контейнер с образцами охлаждался и вакуумировался, а образцы выдерживались для наработки в них радиогенного  $^3\text{He}$ . Затем образцы подвергались процессу детритизации. Удаление трития до радиационно-безопасной концентрации проводилось методом высоковакуумной термодесорбции и методом изотопного замещения трития протием. Расчетная концентрация радиогенного гелия в образцах составляла  $\sim 190$  аррм. Определение фактического содержания наработанного гелия в образцах проводилось методом плавления образца в потоке инертного газа-носителя с помощью модернизированного газоанализатора [3].

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:  $\sigma_b$  – временное сопротивление;  $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести;  $\delta_5$  – относительное удлинение после разрыва;  $\psi$  – относительное сужение после разрыва. Каждая характеристика получена по результатам испытаний двух образцов в одинаковых условиях.

Влияние радиогенного  $^3\text{He}$  исследовалось по результатам растяжения образцов, содержащих  $^3\text{He}$ , в инертной среде при давлении 80 МПа.

Для исследования совместного воздействия водорода и радиогенного  $^3\text{He}$  на механические свойства сплава, испытания на растяжение проходили 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 изменением давления 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].

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

где  $S_0 = 6,6 \text{ см}^3 \text{ Н}_2/\text{см}^3 \text{ Ме} \cdot \text{ати}^{1/2}$  – 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):

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

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

После проведения испытаний на растяжение определялось фактическое содержание в образцах радиогенного  $^3\text{He}$ . Концентрация содержащегося в них  $^3\text{He}$  определялась с помощью модернизированного газоанализатора [3]. Для этого от рабочей части обломков образца отрезались пробы длиной  $\sim 5 \text{ мм}$ .

Фактическое содержание радиогенного  $^3\text{He}$ , экспериментально определенное на пяти пробах, составило  $C_{\text{He}} = (189 \pm 3) \text{ артм}$ . Полученное значение хорошо согласуется с расчетной величиной, полученной из экспериментальных данных при насыщении методом "третиевого трюка" ( $\sim 190 \text{ артм}$ ).

## Результаты испытаний

Вначале были проведены испытания исходных образцов. В табл. 2 приведены основные характеристики исходных образцов, полученные при растяжении в инертной среде при давлении  $\sim 80 \text{ МПа}$  и температуре  $293 \text{ К}$ .

Таблица 2

Характеристики механических свойств исходных образцов

$\sigma_b, \text{ МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{ МПа}$	$\delta_5, \%$	$\psi, \%$
1171	756	37	58

Результаты испытаний на растяжение образцов, содержащих  $^3\text{He}$ , приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики механических свойств образцов, содержащих  $^3\text{He}$ 

Температура испытаний, К	Образец, содержащий $^3\text{He}$		Исходный образец, в среде He
	в среде He	в среде $\text{H}_2$	
$\sigma_b$ , МПа			
293	1164	1154	1171
573	1068	1028	–
873	975	986	–
$\sigma_{0,2}$ , МПа			
293	831	832	756
573	761	764	–
873	703	709	–
$\delta_5$ , %			
293	26	23	37
573	28	16	–
873	26	21	–
$\psi$ , %			
293	38	26	58
573	32	21	–
873	37	28	–

Из табл. 3 видно, что при комнатной температуре  $^3\text{He}$  не оказывает существенного воздействия на временное сопротивление разрыву. Заметное воздействие водорода на эту величину не проявляется во всем интервале исследуемых температур. Под влиянием  $^3\text{He}$  происходит увеличение условного предела текучести на величину  $\sim 10\%$ , водород же не оказывает практически никакого воздействия на  $\sigma_{0,2}$  во всем интервале исследуемых температур.

Наибольшее влияние  $^3\text{He}$  и водорода проявляется на изменении пластических характеристик. Наличие  $^3\text{He}$  приводит к снижению относительного удлинения после разрыва на 30 %. Водород вызывает дополнительное охрупчивание, причем наибольшее снижение  $\delta_5$ , вызванное воздействием водорода, проявляется при 573 К и составляет 43 %. Так же  $^3\text{He}$  вызывает снижение относительного сужения после разрыва на величину  $\sim 35\%$ , водород влияет на данную характеристику во всем интервале исследуемых температур и приводит к ее снижению на 26–33 %.

## Выводы

Наиболее чувствительными к воздействию  $^3\text{He}$  и водорода оказались характеристики пластичности. Максимальное снижение пластичности, вызванное водородом, проявляется при температуре 573 К.

Прочностные характеристики оказались менее чувствительными к воздействию  $^3\text{He}$  и водорода.  $^3\text{He}$  приводит к увеличению условного предела текучести на 10 %. Водород и  $^3\text{He}$  не оказали заметного воздействия на  $\sigma_b$  во всем интервале температур испытаний.

## Список литературы

1. 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". Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Вып. 11. Саров, 2007.
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. N 5, 2002. 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 г.
4. Basunov A. V., Boitsov I. E., Grishechkin S. K., Ismagilov V. Z., Malkov I. L., Khabarov Yu. A. and Yukhimchuk A. A. Physical and mechanical properties of structural materials in gaseous media containing hydrogen isotopes. J. Moscow Phys. Society. N 3, 1999. Vol. 9. P. 237–243.

## **RADIOGENIC $^3\text{He}$ AND HYDROGEN INFLUENCE ON MECHANICAL PROPERTIES OF CrNi40MoCuTiAl ALLOY**

*I. P. Maksimkin, A. Yu. Baurin, I. E. Boitsov, S. K. Grishechkin,  
I. L. Malkov, N. Yu. Tumanova, A. A. Yukhimchuk*

RFNC – All-Russian Research Institute of Experimental Physics

The article presents results of the high-pressure hydrogen (80 MPa), radiogenic  $^3\text{He}$  (concentrations  $\sim 190$  appm) and their joint effects on mechanical properties CrNi40MoCuTiAl alloy in temperature range from 293 to 873 K. The presence of  $^3\text{He}$  does not markedly affect the strength characteristic, but significantly decreases plasticity of alloy. The presence of hydrogen enhances the embrittlement of alloy containing  $^3\text{He}$ .