

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА И РАДИОГЕННОГО ^3He НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА ХН35ВТЮ

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

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Нижегородская обл.

В работе представлены результаты исследования влияния водорода и радиогенного гелия на механические свойства сплава ХН35ВТЮ. Методом «третийевого трюка» было подготовлено три типа стандартных цилиндрических образцов с концентрацией ^3He 90, 230 и 560 аррм. Механические свойства определялись по результатам испытаний на растяжение этих образцов в среде инертного газа и в среде водорода при температурах 20, 300 и 600 °С. Максимальное воздействие водорода и ^3He на механические свойства сплава ХН35ВТЮ наблюдается при температуре 600 °С на образцах с наибольшим содержанием ^3He , под воздействием данных факторов происходит практически полное охрупчивание сплава. Так же проведен сравнительный анализ результатов данной работы с ранее полученными результатами исследований влияния водорода и ^3He на механические свойства сплава аналогичного класса.

Введение

При длительном контакте конструкционных материалов (КМ) с тритий-содержащими средами происходят изменения их свойств и, в первую очередь, таких важных характеристик как механические свойства и кинетические параметры водородопроницаемости. Изменения свойств КМ обусловлены образованием дефектов в материалах в результате накопления ^3He , вызванного радиоактивным распадом растворенного в КМ трития. Особенно сильную деградацию свойств КМ в определенных условиях эксплуатации можно ожидать при совместном воздействии ^3He и изотопов водорода. Поэтому для корректного прогнозирования служебных свойств материалов (и, соответственно, для определения сроков безопасной эксплуатации конструкций и их остаточного ресурса), длительное время подвергающихся воздействию изотопов водорода, следует проводить исследования свойств КМ, насыщенных ^3He , непосредственно в среде изотопов водорода.

В данной работе представлены результаты исследования влияния водорода и радиогенного гелия на механические свойства жаропрочного дисперсионно-твердеющего сплава аустенитного класса ХН35ВТЮ в интервале температур от комнатной до 600 °С. Так же проведен сравнительный анализ результатов данной работы с ранее полученными результатами исследований влияния водорода и ^3He на механические свойства сплава аналогичного класса (ХН40МДТЮ) [1, 2].

Методика испытаний

Исследования проводились на стандартных цилиндрических образцах (тип IV, № 9 ГОСТ 1497-84) с диаметром рабочей части 3 мм и расчетной длиной 15 мм в интервале температур от комнатной до 600 °С. Образцы изготавливались из аустенитного жаропрочного дисперсионно-твердеющего сплава ХН35ВТЮ. Химический состав сплава приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сплава ХН35ВТЮ (массовая доля элементов, %)

C	Mn	Cr	Ni	W	Ti	Al	B	Si	S	P	Fe
≤ 0,08	1,0	14-16	33-37	2,8-3,5	2,4-3,2	0,7-1,4	≤ 0,02	≤ 0,7	≤ 0,02	≤ 0,02	ост.

Накопление ^3He в образцах проводилось методом «тритиевого трюка» [3], были подготовлены образцы с концентрацией ^3He 90, 230 и 560 аppm. Определение фактического содержания наработанного гелия в образцах проводилось с помощью модернизированного газоанализатора [4].

Описание установки для испытаний на растяжение образцов в газовых средах высокого давления – ее устройство, технические характеристики, методика и погрешности измерений – представлено в работе [5]. Определялись следующие характеристики: $\sigma_{\text{в}}$ – 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 ^3He на механические свойства сплава определялось сравнением результатов испытаний на растяжение в среде инертного газа при давлении 80 МПа исходных образцов и образцов, содержащих ^3He .

Влияние водорода и ^3He на механические свойства сплава оценивалось по результатам испытаний на растяжение в среде водорода при давлении 80 МПа исходных образцов и образцов, насыщенных ^3He . Перед испытаниями в среде водорода образцы предварительно наводороживались до равновесной концентрации водорода, соответствующей условиям испытаний. Величина давления водорода и температура наводороживания определялись расчетным путем [6].

Результаты испытаний образцов из сплава ХН35ВТЮ

В табл. 2 приведены характеристики механических свойств исходных (без ^3He) образцов из сплава ХН35ВТЮ, полученные по результатам испытаний в среде инертного газа при давлении 80 МПа и температуре 20 и 600 °С. Поскольку все исходные образцы порвались за меткой, определить δ_5 стандартным образом не удалось. Однако оценить величину этой характеристики можно по истинным диаграммам деформирования образцов (ИДД), построенным по машинным диаграммам растяжения. Метод построения ИДД и оценка по ним δ_5 описаны в работе [7].

Таблица 2

Характеристики механических свойств исходных образцов

$T_{\text{исп}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\delta_5, \%$	$\psi, \%$
20	1270	810	24,9*	44,1
600	1010	800	25,1*	54,2

* Образец порвался за меткой, определить характеристику стандартным образом не удалось, приведенное значение оценено методом построения ИДД.

Испытания на растяжение образцов из сплава ХН35ВТЮ с максимальным содержанием ^3He (≈ 560 артм) проводились в среде водорода и гелия при температурах 20, 300 и 600 $^\circ\text{C}$. Испытания в среде гелия показали, что с увеличением температуры испытаний $\sigma_{0,2}$ практически не меняется, а вот остальные характеристики механических свойств сплава ХН35ВТЮ с данной концентрацией ^3He снижаются. Водород усиливает охрупчивание сплава, вызванное ^3He .

При температуре 600 $^\circ\text{C}$ временное сопротивление разрыву сплава ХН35ВТЮ с содержанием ≈ 560 артм ^3He уменьшается на 20 и на 35 % в среде гелия и водорода соответственно, по сравнению с аналогичными испытаниями при комнатной температуре. Изменения условного предела текучести незначительны, они не превышают 2 %, что находится в рамках погрешности измерений. Не удалось определить $\sigma_{0,2}$ при испытаниях в среде водорода при температуре 600 $^\circ\text{C}$, так как разрушение образца произошло на упругом участке.

Максимальное охрупчивание образцов с наибольшим содержанием ^3He наблюдается при температуре 600 $^\circ\text{C}$. Снижение относительного удлинения и относительного сужения после разрыва в среде инертного газа при температуре 600 $^\circ\text{C}$ составило 86 и 71 % соответственно (по сравнению с испытаниями при комнатной температуре). В среде водорода при температуре 600 $^\circ\text{C}$ разрушение образцов произошло на упругом участке, δ_5 и ψ близки к нулю, т. е. произошло практически стопроцентное охрупчивание сплава.

Образцов с концентрацией ^3He 90 и 230 артм было по шесть штук. Их испытания на растяжение проводились при комнатной температуре в среде инертного газа (для сравнения с исходными свойствами) и при температуре 600 $^\circ\text{C}$ в среде водорода и гелия (для сравнения максимального воздействия водорода и радиогенного ^3He разных концентраций).

Зависимости механических свойств сплава ЭИ787-ВД от концентрации ^3He приведены на рис. 1,а, б и 2,а, б.

Испытания при комнатной температуре в среде инертного газа показали, что с ростом концентрации ^3He не наблюдается заметного изменения временного сопротивления разрыву, а вот при испытаниях в водороде происходит снижение $\sigma_{\text{в}}$. Максимальное снижение (по сравнению с исходными образцами) проявляется у сплава с наибольшим содержанием ^3He и составляет ≈ 12 % (см. рис. 1,а).

Также с ростом концентрации ^3He происходит увеличение условного предела текучести (рис. 1,б) и наибольшее увеличение $\sigma_{0,2}$ составляет ≈ 13 % (у материала с наибольшим содержанием ^3He).

Максимальное охрупчивание сплава наблюдается при температуре 600 °С у образцов содержащих, 560 аppm ^3He .

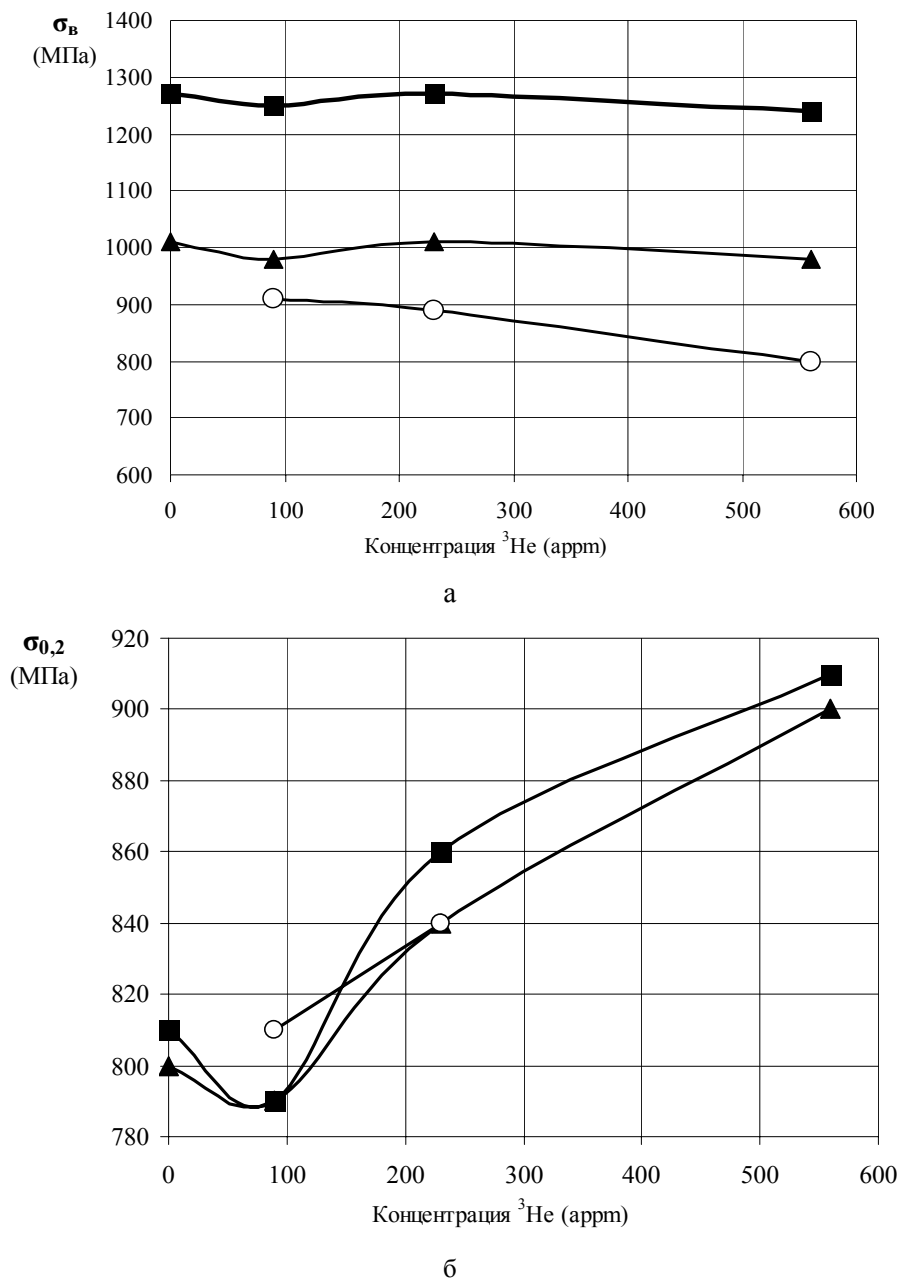
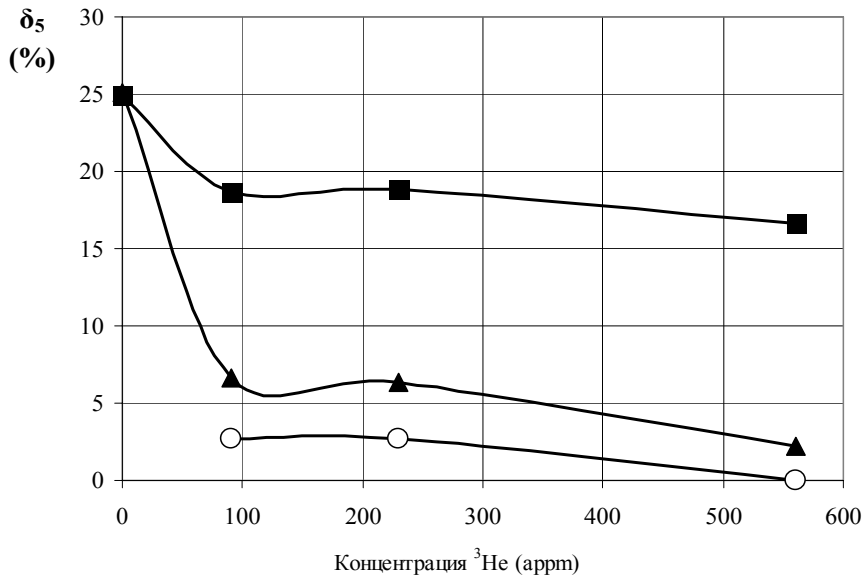
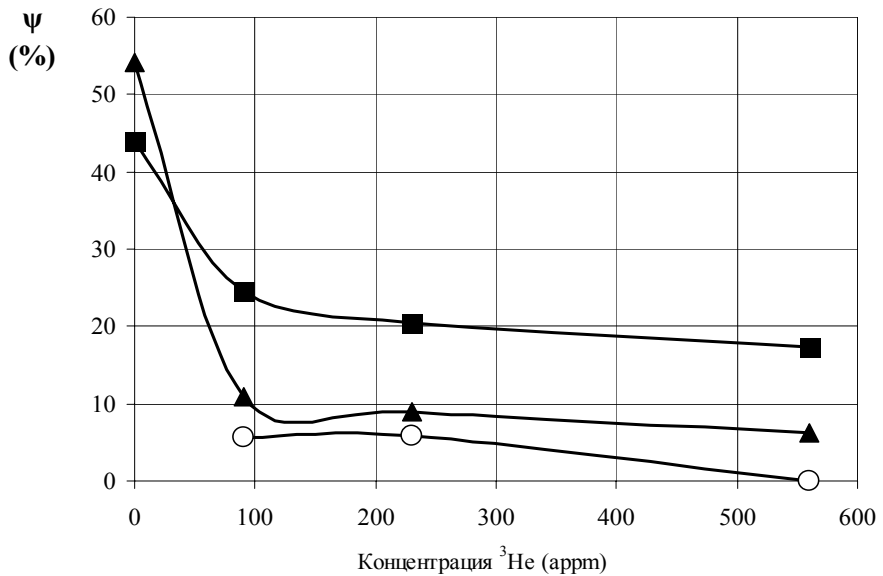


Рис. 1. Изменение прочностных характеристик сплава ЭИ787-ВД в зависимости от концентрации ^3He : а – временное сопротивление разрыву; б – условный предел текучести. ■ – испытания в инертной среде при давлении 80 МПа и комнатной температуре; ▲ – испытания в инертной среде при давлении 80 МПа и температуре 600°С; ○ – испытания в среде водорода при давлении 80 МПа и температуре 600°С



а



б

Рис. 2. Изменение характеристик пластичности сплава ЭИ787-ВД в зависимости от концентрации ^3He : а – относительное удлинение после разрыва; б – относительное сужение после разрыва. ■ – испытания в инертной среде при давлении 80 МПа и комнатной температуре; ▲ – испытания в инертной среде при давлении 80 МПа и температуре 600°C; ○ – испытания в среде водорода при давлении 80 МПа и температуре 600°C

Результаты испытаний образцов из сплава ХН40МДТЮ

Ранее нами было проведено исследование влияния водорода и ^3He на механические свойства аустенитного жаропрочного дисперсионно-твердеющего сплава ХН40МДТЮ [1, 2].

Прежде всего следует отметить, что при накоплении ^3He в образцах из сплава ХН40МДТЮ использовалось два способа реализации метода «третий трюк».

Первый способ заключался в том, что образцы нагревали до нужной температуры, подавали необходимое давление трития и выдерживали при таких условиях в течение времени, достаточного для достижения равновесной концентрации трития в образцах. После этого образцы охлаждались и выдерживались при комнатной температуре, для наработки необходимой концентрации ^3He вследствие радиоактивного распада трития. Затем образцы подвергались детритизации. Назовем этот способ способом № 1.

При реализации второго способа образцы в течение всего времени наработки ^3He выдерживались в атмосфере трития при заданных давлении и температуре. Назовем этот способ способом №2.

Способом № 1 были подготовлены образцы, содержащие ≈ 30 , 80 и 235 артм ^3He , а способом № 2 – 140 и 250 артм ^3He . Поскольку водород и ^3He в наибольшей степени воздействуют на характеристики пластичности, то рассмотрим влияние водорода и ^3He на механические свойства сплава ХН40МДТЮ на примере относительного удлинения и относительного сужения после разрыва.

В табл. 3 приведены характеристики механических свойств исходных (без ^3He) образцов из сплава ХН40МДТЮ, полученные по результатам испытаний на растяжение в среде инертного газа при давлении 80 МПа и комнатной температуре. Данные образцы были изготовлены из материала той же партии (партия 1), что и образцы, накопление в которых ^3He выполнялось способом № 1. Характеристики механических свойств исходных образцов для способа № 2 (партия 2) представлены в табл. 4.

Таблица 3

Характеристики механических свойств
исходных образцов из партии 1

σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %
1170	760	36,9	58,1

Таблица 4

Характеристики механических свойств исходных образцов из партии 2, полученные по результатам испытаний в инертной среде при давлении 80 МПа

Температура испытаний, $^{\circ}\text{C}$	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %
20	1370	1060	20,6	43,5
300	1310	910	14	33
600	1210	1000	20,8	39,9

Из таблиц 3 и 4 видно, что исходные свойства образцов разные, образцы из партии 1 менее прочные, но более пластичные. Результаты испытаний (относительное удлинение и относительное сужение после разрыва) образцов из партий 1 и 2 представлены в таблицах 5 и 6 соответственно.

Таблица 5

Характеристики пластичности образцов из партии 1

Характеристики, %	Температура испытаний, °С	C(³ He) ≈ 30 аррм		C(³ He) ≈ 80 аррм		C(³ He) ≈ 190 аррм	
		Испытательная среда					
		He	H ₂	He	H ₂	He	H ₂
δ ₅	20	36,9	–	32,5	–	26	23
ψ		45,2	–	39,1	–	38	26
δ ₅	300	–	–	–	–	28	16
ψ		–	–	–	–	32	21
δ ₅	600	22,1	*	19,8	14,7	25,8	21,5
ψ		29,1	19,1	23,9	18,2	36,5	27,8

* Образец порвался за меткой, определить характеристику не удалось.

Образцы с максимальным содержанием ³He (190 аррм) были испытаны на растяжение в среде водорода и гелия при давлении 80 МПа и температурах 20, 300 и 600 °С. В ранее проведенных исследованиях было показано, что максимальное воздействие водорода и ³He на механические свойства сплава ХН40МДТЮ проявляется при температуре 600 °С. Так как количество образцов с концентрациями 30 и 80 аррм было ограничено (по 6 шт.), то их испытывали при температуре 20 °С в среде гелия (для сравнения с исходными образцами, испытанными в таких же условиях) и при температуре 600 °С в среде водорода и гелия (для оценки максимального совместного воздействия водорода и ³He).

Из табл. 5 видно, что с увеличением концентрации ³He при испытаниях при комнатной температуре в среде инертного газа происходит заметное снижение характеристик пластичности исследуемого сплава. Максимальное снижение характеристик пластичности наблюдается у образцов с концентрацией ³He 190 аррм и составляет ≈ 30 % и ≈ 35 % для относительного удлинения и относительного сужения после разрыва соответственно. При температуре испытаний 600 °С для характеристик пластичности проявился совершенно иной эффект. Материал с максимальной концентрацией ³He (190 аррм) оказался наиболее пластичным при данной температуре при испытаниях как в среде водорода, так и в среде инертного газа.

Таблица 6

Характеристики пластичности образцов из партии 2

Характеристики, %	Температура испытаний, °С	C(³ He) ≈ 140 аррм		C(³ He) ≈ 250 аррм	
		Испытательная среда			
		He	H ₂	He	H ₂
δ ₅	20	6,4	3,8	–*	1,2
ψ		8,1	8	4,4	4,2
δ ₅	300	5,2	1,5	1	–*
ψ		8,9	7,2	4,9	0,9
δ ₅	600	2,4	0,8	≈ 0	≈ 0
ψ		6,9	4,6	≈ 0	≈ 0

* Образец порвался за меткой, определить характеристику не удалось.

Из таблиц 4 и 6 видно, что ^3He существенно охрупчивает сплав при всех температурах испытаний, а водород в еще большей степени усиливает охрупчивание сплава. При температуре 600 °С для образцов с концентрацией 140 аррм δ_5 и ψ в результате совместного воздействия водорода и ^3He снижаются на 96 % и 88 % соответственно. А у образцов с концентрацией 250 аррм ^3He при тех же условиях испытаний происходит практически полное охрупчивание сплава, значение характеристик пластичности близко к нулю. Интересным в данной ситуации является тот факт, что у образцов из партии 1 с концентрацией ^3He 190 аррм при испытаниях в среде водорода при температуре 873 К значения δ_5 в 27, а ψ в 6 раз больше соответствующих характеристик образцов из партии 2 с концентрацией 140 аррм, не говоря уже об образцах с концентрацией 250 аррм, у которых данные характеристики вообще близки к нулю.

Между образцами из партий 1 и 2 есть два существенных отличия, это различие исходных свойств и способа реализации метода тритиевого трюка.

Следует отметить, что для образцов из сплава ХН35ВТЮ (о которых говорилось выше) при накоплении ^3He использовался способ № 1, как и для образцов из сплава ХН40МДТЮ партии 2. Однако, характер изменения механических свойств образцов из сплава ХН35ВТЮ сходен с характером изменения механических свойств образцов из сплава ХН40МДТЮ, при накоплении ^3He в которых использовался способ № 2. Поскольку ХН40МДТЮ и ХН35ВТЮ очень близкие сплавы одного класса, можно сделать вывод, что способ наработки ^3He не влияет на характер изменения механических свойств. Следовательно, проявившееся различие в характере изменения механических свойств образцов из сплава ХН40МДТЮ партий 1 и 2, содержащих ^3He , вызвано начальным состоянием материала, так как исходные свойства образцов из партий 1 и 2 различны. Однако, для окончательного утверждения этого факта, необходимы дополнительные исследования.

Заключение

В данной работе было выполнено исследование влияния водорода и гелия-3 на механические свойства сплава ХН35ВТЮ. Так же проведен сравнительный анализ ранее полученных результатов влияния водорода и ^3He на механические свойства сплава ХН40МДТЮ.

С ростом концентрации ^3He в сплаве ХН35ВТЮ происходит увеличение условного предела текучести (на ≈ 13 %) и существенное снижение характеристик пластичности. Максимальное снижение пластических характеристик у сплава ХН35ВТЮ проявляется у образцов с наибольшим содержанием ^3He (560 аррм) при температуре 600 °С и составляет: в среде инертного газа 86 и 71 % для относительного удлинения и относительного сужения после разрыва соответственно; в водороде – 100 % как для относительного удлинения так и для относительного сужения после разрыва, то есть, в среде водорода при данных условиях испытаний происходит практически полное охрупчивание сплава.

Исследование влияния водорода и ^3He на механические свойства сплава ХН40МДТЮ проводилось на образцах из двух разных партий. Нарботка ^3He

в данных образцах проводилась двумя различными способами. Проявившееся существенное отличие в характере изменения механических характеристик при испытаниях образцов из сплава ХН40МДТЮ двух разных партий, по-видимому, вызвано различием исходного состояния материала. Однако этот вопрос требует дополнительных исследований.

Список литературы

1. Максимкин И. П., Баурин А. Ю., Бойцов И. Е. и др. Влияние водорода и радиогенного ^3He на механические свойства сплава ХН40МДТЮ–ИД // Сб. докл. Пятой Международной школы молодых ученых и специалистов «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами IHISM'09». Саров, 5–10 июля 2009 г.

2. Бойцов И. Е., Баурин А. Ю., Гришечкин С. К. и др. Влияние водорода высокого давления и радиогенного ^3He на механические свойства и структуру сплава ХН40МДТЮ–ИД // Сб. докл. Четвертой Международной конференции и Шестой Международной школы молодых ученых и специалистов «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами IHISM'10». Воронеж, 5–10 июля 2010 г.

3. Малков И. Л., Клевцов В. Г., Юхимчук А. А. Применение метода «тритиевого трюка» для ускоренного накопления ^3He в конструкционных материалах // *Материаловедение*. 2002, № 5. С. 34–37.

4. Юхимчук А. А., Златоустовский С. В., Бабушкин П. Л., Polemitis Y. Установка для определения содержания газообразных компонентов в исследуемом образце: Пат. РФ на полезную модель № 49273 // Бюллетень изобретений и полезных моделей №31 от 10.11.2005.

5. 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.

6. 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. 609–612.

7. Максимкин И. П., Бойцов И. Е., Малков И. Л. и др. Влияние внешнего водорода на истинную диаграмму деформирования хромникелевого сплава ХН40МДТЮ // Сб. докл. Четвертой Международной конференции и Шестой Международной школы молодых ученых и специалистов «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами IHISM'10». Воронеж, 5–10 июля 2010 г.