

## ГЕЛИЕВАЯ ХРУПКОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*И. Л. Малков*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Нижегородская обл.

Проблема гелиевой хрупкости конструкционных материалов (КМ) возникла в 1960-х годах в связи с развитием атомной энергетики. Образование и накопление гелия в КМ может происходить в результате воздействия на материалы потоков нейтронов или протонов, радиоактивного распада растворенного в КМ трития, имплантации  $\alpha$  частиц. Накопление гелия выше критической концентрации приводит к деградации механических свойств КМ. Негативное влияние гелия, как правило, проявляется в резком снижении пластических свойств КМ при высоких температурах ( $>400$  °С).

В статье описывается применяемая в РФЯЦ-ВНИИЭФ методика исследования гелиевой хрупкости КМ. На основании анализа литературных данных и результатов исследования гелиевой хрупкости, полученных при выполнении Проектов МНТЦ № 2276 и 3672, рассмотрены такие аспекты гелиевой хрупкости КМ, как структурные изменения, влияние гелия на механические свойства и морфологию изломов.

Под термином «гелиевая хрупкость» обычно понимается деградация свойств конструкционных материалов, обусловленная повышенным содержанием в них гелия. Гелий, как и все инертные газы, практически нерастворим в КМ, поэтому возможность его влияния на свойства КМ до середины пятидесятых годов прошлого века считалась абсурдной. Ситуация изменилась в связи с развитием атомной энергетики. Взаимодействие потоков нейтронов и атомов КМ приводило не только к каскаду смещений в кристаллической решетке, но и образованию новых элементов, одним из которых является гелий. В табл. 1 [1] приведены оценочные величины радиационного повреждения (сна) и концентрации гелия в разных КМ реактора синтеза и реактора на быстрых нейтронах после 10 лет эксплуатации.

Данные табл. 1 показывают, что при эксплуатации реакторов в КМ наряду с радиационными повреждениями нарабатываются значительные количества гелия. Концентрация гелия зависит от химического состава КМ (от 600 арут в Nb до 6300 арут в Al) и типа реактора: из-за более жесткого спектра энергий нейтронов в КМ реактора синтеза концентрация гелия во много раз больше, чем в КМ реактора на быстрых нейтронах.

Таблица 1

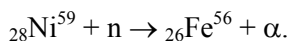
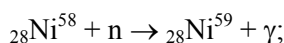
Оценочные величины радиационного повреждения (сна) и концентрации гелия в КМ реактора синтеза и реактора на быстрых нейтронах после 10 лет эксплуатации

КМ	Реактор синтеза		Реактор на быстрых нейтронах
	Радиационные повреждения, сна	Концентрация гелия, аррм	Концентрация гелия, аррм
Al	280	6300	–
Аустенитная сталь (SS 316)	220	3000	100
Сплав на основе никеля (PE 16)	240	4800	200
Ферритная сталь (HT 9)	220	2200	–
Nb	140	600	20
Ванадиевый сплав (V-15Cr-5Ti)	220	1000	–
Титановый сплав (Ti-6Al-4V)	320	2900	–

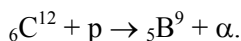
Наработка гелия в КМ может происходить вследствие следующих процессов:

- облучение КМ нейтронами;
- облучение КМ ионами протия или дейтерия;
- имплантация  $\alpha$ -частиц в КМ;
- радиоактивный распад трития, растворенного в КМ («тритиевый трюк»)

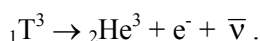
Так образование гелия в КМ, содержащих Ni, при облучении их тепловыми нейтронами происходит в 2 этапа:



При облучении КМ ионами протия или дейтерия с энергией порядка 10 МэВ одной из возможных реакций образования гелия в сталях является следующая реакция:



Высокие концентрации гелия в КМ можно также получить путем имплантации ядер гелия при облучении КМ  $\alpha$ -частицами или с помощью «тритиевого трюка», в котором наработка гелия в КМ происходит в результате радиоактивного распада растворенного в материале трития:



В табл. 2 [2] и на рис. 1 [1] приведены характерные скорости накопления гелия в КМ и отношения концентрации гелия к числу смещений на атом (сна) в ядерной технике.

Таблица 2

## Характерные скорости накопления гелия

Процесс образования гелия	Источник образования гелия	Скорость накопления гелия
Облучение нейтронами ( $n, \alpha$ )	Реактор на быстрых нейтронах	5–15 ppm/год
	Реактор синтеза	50–300 ppm/год
Облучение протонами ( $p, \alpha$ )	Нейтронный источник	до 10 ppm/год
$\alpha$	Имплантация	до нескольких процентов в час
«Тритиевый трюк» ( ${}^3_1\text{T}, {}^3_2\text{He}^3$ )	Радиоактивный распад трития при хранении	до 10 ppm/год

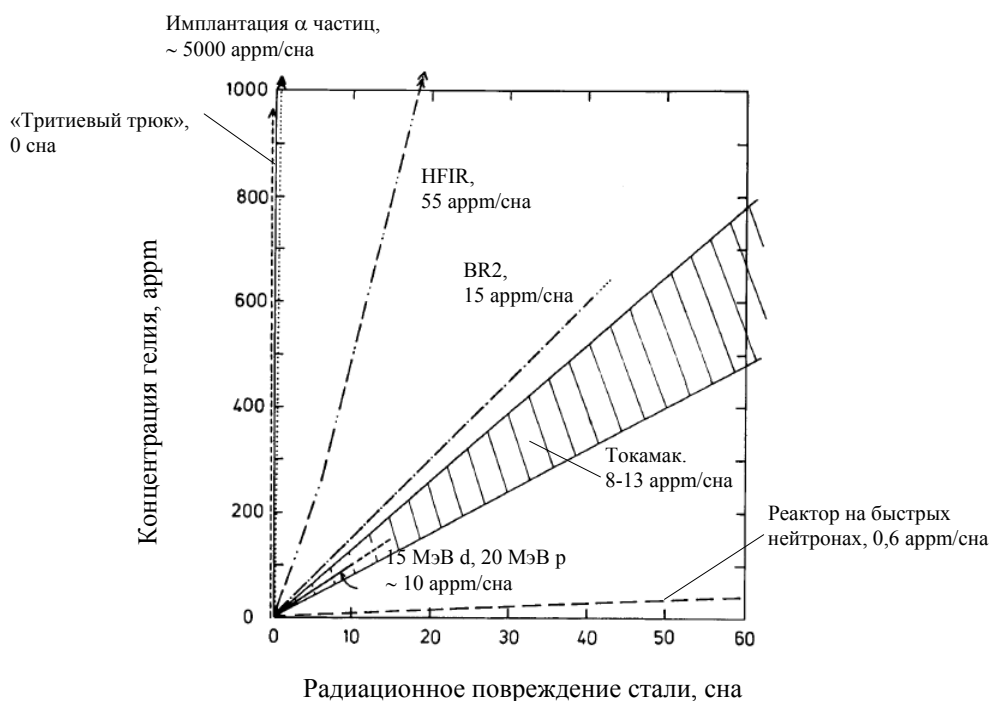


Рис. 1. Зависимость концентрации гелия от радиационного повреждения для различных типов реакторов и ускорителей и методов введения гелия (HFIR и BR2 – исследовательские реакторы в Национальной Лаборатории Оак-Ридж, США и Ядерном Центре, Бельгия, соответственно)

Первые систематические исследования гелиевой хрупкости КМ были проведены в шестидесятых годах прошлого века. Barnes [3] установил, что наблюдаемое высокотемпературное охрупчивание облученных сталей обусловлено наличием по границам зерен пузырьков гелия. На рис. 2 приведены гелиевые пузырьки на границе зерен стали 12X18H10T после отжига в течение 1 часа при 1370 К [4].

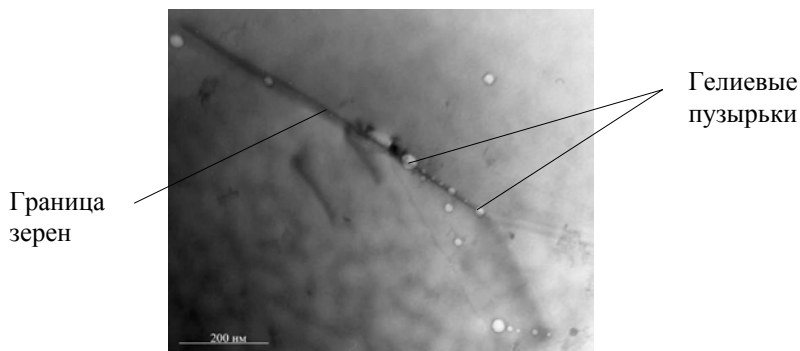


Рис. 2. Гелиевые пузырьки на границе зерен стали 12X18H10T

Плоские образцы из стали 12X18H10T толщиной 0,2 мм насыщались тритием при давлении 50 МПа и при температуре 770 К в течение 16 часов. После охлаждения образцы хранились при комнатной температуре в течение 9000 часов. Экспериментально определенная на модернизированном газоанализаторе ОН 900 фирмы «ELTRA» [5] концентрация гелия составила 75 аppm.

Типичный характер влияния гелия на механические свойства приведен на рис. 3 [6] и 4 [7]. Результаты на рис. 3 показывают существенное влияние гелия на механические свойства стали AISI 316 SS; практически на порядок снижаются характеристики ползучести (время разрушения и деформация разрушения). На рис. 4 приведены результаты испытаний облученных образцов при практически одинаковых радиационных повреждениях, но отличающихся концентрацией гелия. Сталь, содержащая низкую концентрацию гелия, во всем испытанном диапазоне температур имеет более высокий предел текучести по сравнению со сталью, не содержащую гелий. В то же время предел текучести стали с высокой концентрацией гелия становится меньше предела текучести исходной стали при температуре  $\sim 600$  °C, а при  $T > 650$  °C образцы из этой стали разрушаются хрупко, практически без пластической деформации. Пластичность стали с низкой концентрацией гелия находится на достаточно высоком уровне ( $\delta = 10\text{--}20\%$ ) при температурах до 700 °C, до недопустимо низкого уровня она падает при  $T = 750$  °C. Таким образом, повышение концентрации гелия в стали AISI 316 SS приводит к снижению верхней границы температур применения КМ как минимум на 100–200 градусов и ограничивает ее использование в конструкциях ядерных установок, в которых возможна наработка больших концентраций гелия.

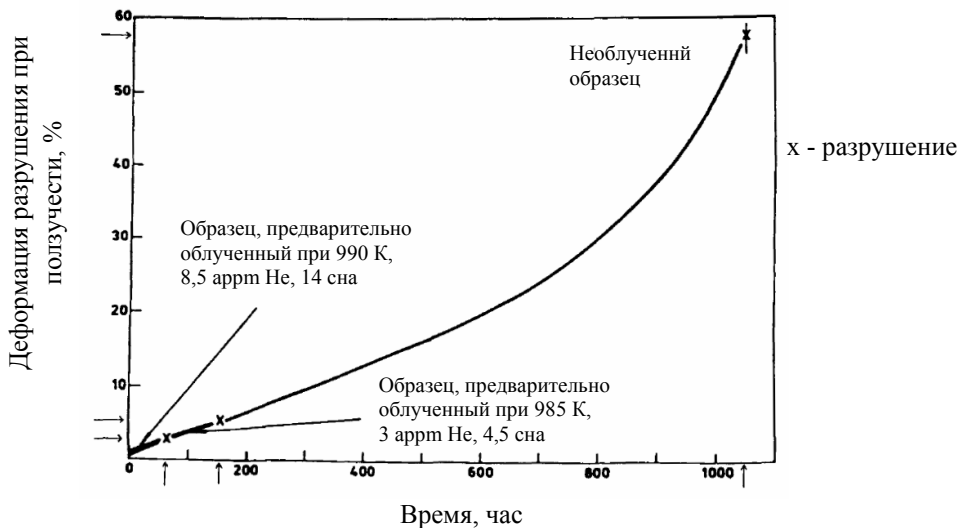


Рис. 3. Сравнение кривых ползучести необлученных и предварительно облученных в реакторе образцов из стали AISI 316 SS. Условия испытаний:  $T = 1033 \text{ K}$ ,  $\sigma = 69 \text{ МПа}$

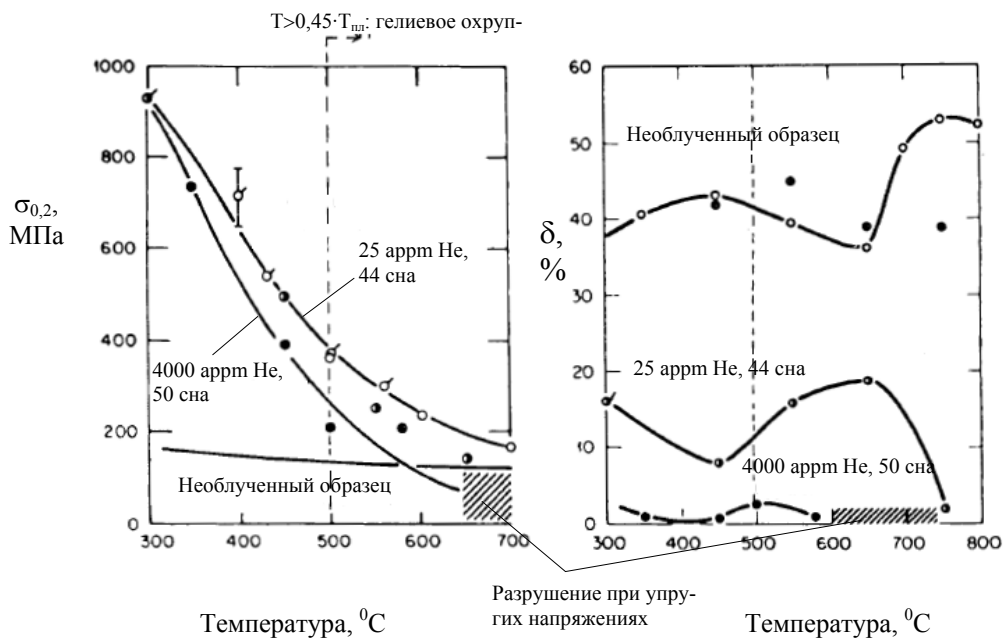


Рис. 4. Температурная зависимость механических свойств отожженной стали AISI 316 в трех состояниях: необлученная; предварительно облученная в реакторе на быстрых нейтронах (25 аррм He, 44 сна); предварительно облученная на HFIR (4000 аррм He, 50 сна)

При проведении исследований влияния гелия на свойства КМ особый интерес представляют способы создания высоких концентраций гелия без дополнительных искажений кристаллической решетки. Результаты, приведен-

ные на рис. 1, показывают, что существует только два способа накопления больших концентраций гелия в КМ, которые не сопровождаются радиационными повреждениями: имплантация  $\alpha$  частиц с энергиями ниже пороговой, вызывающей радиационные повреждения, и «тритиевый трюк». Преимущества и недостатки каждого из этих способов накопления гелия в КМ приведены в табл. 3 [8].

Таблица 3

## Сравнение двух способов накопления гелия в КМ

Способ накопления гелия	Преимущества	Ограничения
«Тритиевый трюк»	Образцы с содержанием гелия по всему объему	Требуется специальное оборудование
	Минимальное влияние поверхности	Тритий должен растворяться в КМ
	Возможность получения образцов с небольшими концентрациями (несколько аปรт) гелия	Влияние на распределение гелия ловушек и сегрегаций Низкая скорость наработки гелия
Имплантация $\alpha$ частиц	Высокая скорость наработки гелия	Накопление гелия только в приповерхностных слоях
	Можно достичь высокую локальную концентрацию трития	Большое влияние состояния поверхности
	Нет посторонних загрязнений	Трудности работы с легкими металлами

В настоящей статье основное внимание будет уделено гелиевой хрупкости КМ при накоплении гелия методом «тритиевого трюка». Такой выбор обусловлен рядом причин.

Во-первых, этот способ позволяет проводить исследования «чистой» гелиевой хрупкости КМ без влияния дополнительных факторов.

Во-вторых, ограничения метода «тритиевого трюка», приведенные в табл. 3, не являются лимитирующими при проведении исследований в РФЯЦ-ВНИИЭФ, поскольку разработано и изготовлено специальное оборудование для работы с газообразным тритием [9–11], растворимость трития в исследуемых КМ достаточно высока [12, 13], разработана методика ускоренного накопления гелия в КМ [14–17].

Комплекс оборудования для проведения исследований гелиевой хрупкости КМ, используемый в РФЯЦ-ВНИИЭФ, состоит из четырех блоков:

- установки для тритирования КМ, хранения образцов и их детритизации [14, 18, 19];
- установки для проведения исследований влияния гелия на механические свойства КМ [20, 21];
- приборы для измерения содержания гелия и трития в КМ [5];
- электронные микроскопы для исследования структуры КМ, содержащих гелий [4, 22].

Приведем краткую характеристику комплекса оборудования для проведения исследований гелиевой хрупкости КМ.

Для насыщения исследуемых КМ газообразным тритием используется комплекс для подготовки газовой смеси (КПГС). Подробно конструкция КПГС описана в работе [14]. КПГС позволяет проводить тритирование образ-

цов при давлении трития до 50 МПа и температурах до 900 К, непрерывное время тритирования до 1500 часов, объем емкости для образцов до 150 см<sup>3</sup>. На рис. 5 приведена типичная диаграмма тритирования.

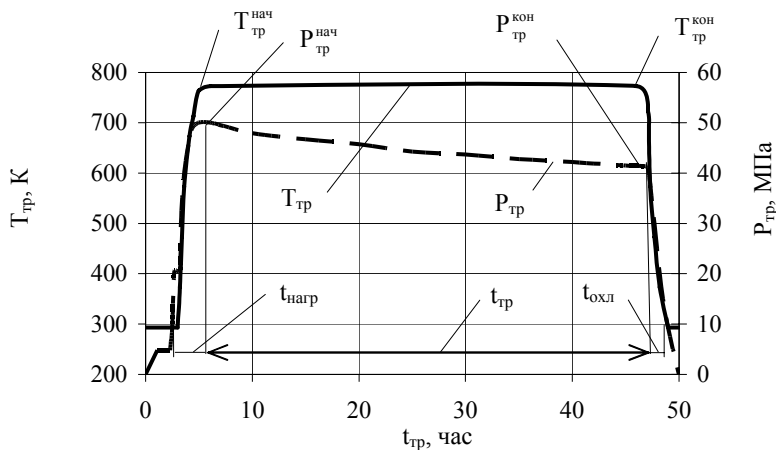


Рис. 5. Типичная диаграмма тритирования:  $t_{\text{нагр}}$  – время нагрева до  $P_{\text{тр}}^{\text{нач}}$ ;  $T_{\text{тр}}^{\text{нач}}$  и  $P_{\text{тр}}^{\text{нач}}$  – начальная температура и давление тритирования;  $T_{\text{тр}}^{\text{кон}}$  и  $P_{\text{тр}}^{\text{кон}}$  – температура и давление в конце тритирования;  $t_{\text{тр}}$  – продолжительность тритирования;  $t_{\text{охл}}$  – время охлаждения до  $\sim 370$  К

Хранение образцов КМ, насыщенных тритием, проводится для наработки требуемого количества гелия.

Детритизация образцов проводится для снижения содержания трития в образцах до радиационно-безопасного уровня и для устранения (или максимального снижения) охрупчивающего влияния собственно трития, как изотопа водорода, на физико-механические свойства КМ. Для детритизации образцов применяются два метода:

- метод высоковакуумной термодесорбции, то есть, длительная выдержка образцов при повышенных температурах и предельно низком остаточном давлении над ними [18];

- метод изотопного замещения, то есть замещение трития, растворенного в материале образцов, водородом при выдержках образцов в нагретом состоянии под избыточным давлением водорода в течение определенного времени с последующим вакуумированием образцов [19].

Исследования влияния гелия на механические свойства КМ проводятся путем испытания на растяжение стандартных цилиндрических образцов. Подробно описание установок для определения механических свойств КМ с гелием приведено в работах [20, 21]. Установки определения механических свойств КМ имеют следующие основные характеристики:

- максимальная нагрузка 100 кН;
- скорость перемещения траверсы 0,01–500 мм/мин.;
- давление водорода до 150 МПа;
- температура испытаний 200–1100 К.

При испытаниях образцов на растяжение определяют:  $\sigma_b$  – временное сопротивление;  $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести;  $\delta$  – относительное удлинение после разрыва;  $\psi$  – относительное сужение после разрыва.

Экспериментальное измерение содержания  $^3\text{He}$  и остаточного трития в исследуемых материалах проводится с помощью модернизированного газоанализатора ОН 900 фирмы «ELTRA» [5].

Структура КМ с гелием изучается методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), а поверхности изломов цилиндрических образцов после испытаний на растяжение – методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) [4, 22].

Как уже отмечалось выше одним из ограничений применения метода «тритиевого трюка» для исследования гелиевой хрупкости КМ является низкая скорость наработки гелия. Временная зависимость концентрации гелия в КМ описывается выражением [23]:

$$S_{\text{He}} = S_{T_2} [1 - \exp(-\lambda t)] = S_0 e^{-\frac{H_s}{RT}} \sqrt{P} [1 - \exp(-\lambda t)],$$

где  $S_{T_2}$  – концентрация трития в КМ;  $\lambda$  – постоянная распада трития;  $t$  – время хранения,  $S_0$  – константа растворимости трития в КМ;  $H_s$  – теплота растворения трития в КМ;  $T$  – абсолютная температура при насыщении КМ тритием;  $P$  – давление трития;  $R$  – газовая постоянная. При комнатной температуре и давлении трития 0,1 МПа скорость наработки гелия в стали 12Х18Н10Т составляет несколько аррм в год и для создания концентраций гелия в КМ ~100 аррм требуется несколько десятков лет. Ускорить процесс накопления гелия можно путем повышения температуры и давления тритирования. Так при  $T = 800$  К и  $P = 50$  МПа скорость наработки гелия увеличивается на два порядка. Такой подход для создания высоких концентраций гелия в КМ был применен в работах [12, 13]. В РФЯЦ-ВНИИЭФ для уменьшения временных и материальных затрат при получении образцов с высоким содержанием гелия была разработана расчетно-экспериментальная методика, подробное описание которой приведено в работах [14–16, 19]. Методика предусматривает выполнение следующих этапов: насыщение образцов тритием (тритирование) до заданных концентраций, охлаждение тритированных образцов и их последующая выдержка, при которой вследствие радиоактивного распада трития в них будет накапливаться гелий.

В общем виде концентрация гелия в КМ является функцией следующих параметров процесса его наработки:

$$S_{\text{He}} = f(T_{\text{тр}}, t_{\text{тр}}, P_{\text{тр}}, V_{\text{охл}}, T_{\text{выд}}, t_{\text{выд}}),$$

где  $T_{\text{тр}}$  – температура тритирования образцов,  $t_{\text{тр}}$  – время тритирования,  $P_{\text{тр}}$  – давление трития при тритировании,  $V_{\text{охл}}$  – скорость охлаждения образцов,  $T_{\text{выд}}$  – температура выдержки,  $t_{\text{выд}}$  – время выдержки. Первые три параметра ( $T_{\text{тр}}$ ,  $t_{\text{тр}}$ ,  $P_{\text{тр}}$ ) определяют концентрацию трития в КМ при тритировании ( $S_{T_2}$ ), от скорости охлаждения  $V_{\text{охл}}$  образцов зависит количество оставшегося в КМ трития после охлаждения ( $S_{T_2}^{\text{ост}}$ ), а от температуры и времени выдержки  $T_{\text{выд}}$ ,  $t_{\text{выд}}$  – изменение концентрации трития и  $^3\text{He}$  в процессе выдержки. С помощью при-



веденной выше методики можно выбрать оптимальные параметры процесса наработки гелия в КМ. В качестве примера приведем параметры наработки гелия в стандартных цилиндрических образцах из стали 12X18H10T:

- температура тритирования  $T_{тр} - 773$  К;
- давление тритирования  $P_{тр} - 50$  МПа;
- время тритирования  $t_{тр} - 40$  часов;
- скорость охлаждения  $V_{охл} - 0,1$  К/с;
- температура выдержки  $T_{выд} -$  комнатная температура;
- время выдержки  $t_{выд},$  час (концентрация  $^3\text{He}$ , аррм) – 3500 (75), 7000 (130), 12500 (240), 27000 (500).

Скорость наработки гелия в стали 12X18H10T для данных параметров составила  $\sim 160$  аррм He/год.

Характер изменения механических свойств стали 12X18H10T в зависимости от концентрации гелия при температуре 870 К приведен на рис. 6 [23].

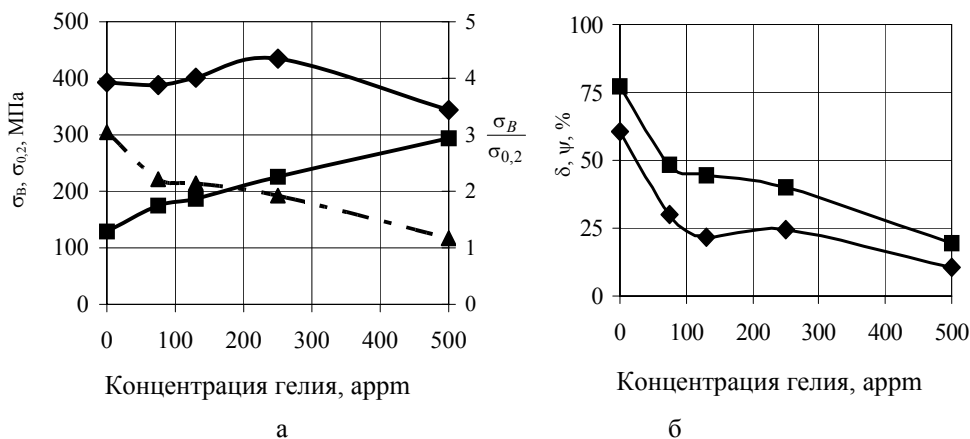


Рис. 6. Зависимость механических свойств стали 12X18H10T от концентрации гелия при температуре 870 К: а –  $\diamond$  –  $\sigma_B$ ,  $\blacksquare$  –  $\sigma_{0,2}$ ,  $\blacktriangle$  –  $\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2}}$ ; б –  $\diamond$  –  $\delta$ ,  $\blacksquare$  –  $\psi$

Результаты показывают, что предел прочности стали 12X18H10T при концентрации гелия до 250 аррм He практически не зависит от концентрации гелия и только при 500 аррм He наблюдается его снижение. Предел текучести практически линейно увеличивается с ростом концентрации гелия. Увеличение предела текучести сталей этого класса при насыщении КМ гелием отмечалось и ранее [24]. Такой характер зависимости  $\sigma_{0,2}$  от концентрации  $^3\text{He}$  можно объяснить с позиции теории упрочнения материалов дисперсионными частицами [25]. Согласно этой теории предел текучести определяется напряжением, необходимым для свободного движения дислокаций в кристаллической решетке, содержащей равномерно распределенные дисперсионные частицы [26]. Дисперсионные частицы тормозят движение дислокаций и, значит, величина предела текучести зависит от количества и размеров частиц. Если дислокации под действием приложенного напряжения выгибаются между час-

тицами и пробегает дальше, оставляя дислокационные петли (механизм Орована), то предел текучести будет изменяться обратно пропорционально расстоянию между дисперсионными частицами ( $\lambda$ )  $\sigma_T = \sigma_0 + a/\lambda$ , где  $a$  – постоянная,  $\sigma_0$  – предел текучести материала при отсутствии частиц [27]. Изучение структуры стали 12X18H10T, содержащей гелий, с помощью ПЭМ показало наличие большого количества гелиевых кластеров (плейтлетов), рис. 7 [4].

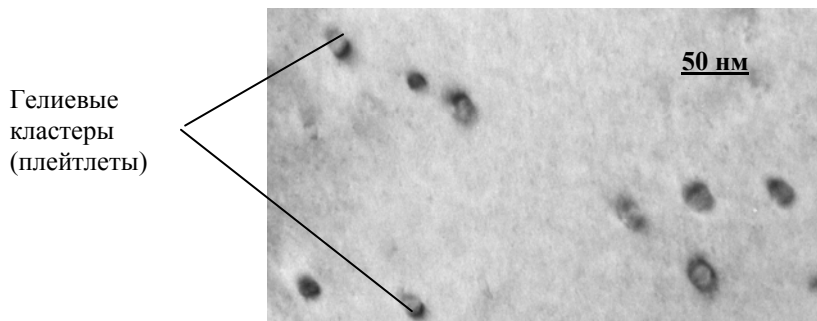


Рис. 7. Структура стали 12X18H10T, содержащей 75 атрм гелия

Так в стали 12X18H10T, содержащей 75 атрм гелия, плотность гелиевых кластеров составляет  $\rho \approx 6 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$  со средним диаметром  $d \approx 20 \text{ нм}$ . Гелиевые кластеры вполне могут являться дисперсными частицами, тормозящими движение дислокаций. Объемную долю гелиевых кластеров можно определить по формуле:  $f = \frac{\pi d^3 \rho}{6}$ , а среднее расстояние между частицами из выражения, приведенного в работе [27]:  $\frac{\lambda + d}{d} = \frac{0,82}{f^{1/3}}$ . Например при концентрации  ${}^3\text{He} \sim 75 \text{ атрм}$  среднее расстояние между частицами равно  $\lambda \approx 100 \text{ нм}$ . На рис. 8 представлена зависимость  $\sigma_{0,2}$  стали 12X18H10T от обратной величины среднего расстояния между гелиевыми кластерами  $1/\lambda$ .

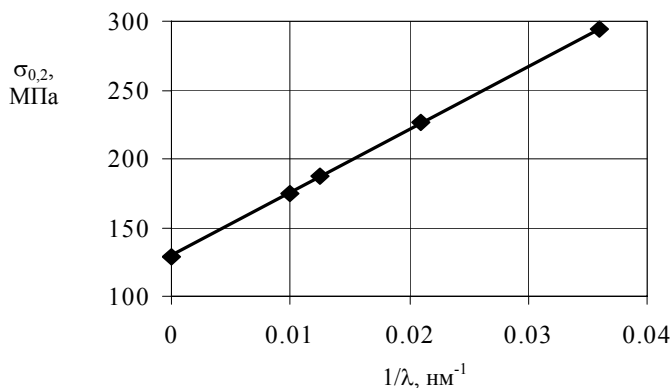
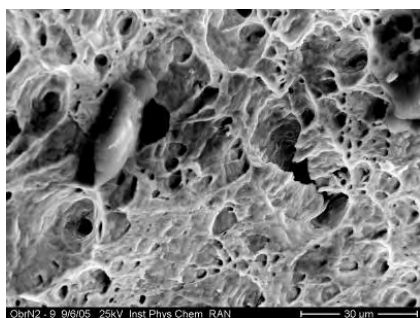


Рис. 8. Зависимость предела текучести  $\sigma_{0,2}$  от обратной величины среднего расстояния между гелиевыми кластерами  $1/\lambda$

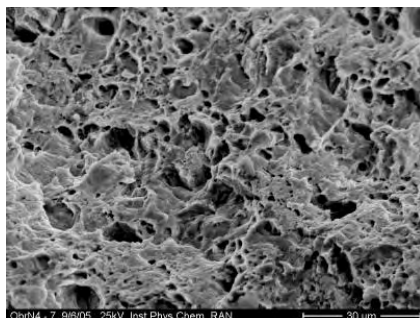
Линейная зависимость между  $\sigma_{0,2}$  и  $1/\lambda$  указывает на применимость теории упрочнения КМ дисперсными частицами для объяснения увеличения предела текучести стали 12X18H10T, содержащей гелий.

Об охрупчивании стали 12X18H10T с увеличением содержания гелия свидетельствует уменьшение отношения предела прочности к пределу текучести: оно изменяется с  $\sim 3$  до  $\sim 1,2$  (рис. 6,а) и резкое уменьшение характеристик пластичности (рис. 6,б) – снижение пластичности составило  $\sim 80\%$ .

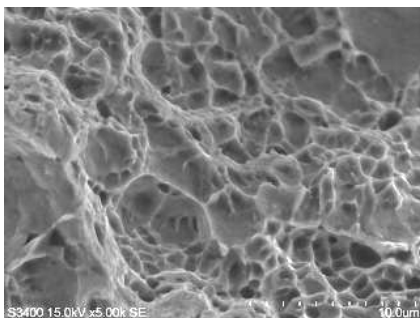
Морфология изломов образцов при испытании на растяжение также указывает на охрупчивающее влияние гелия (рис. 9) [22].



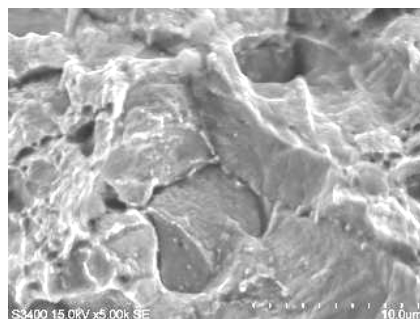
а) исходный образец



б) 75 appm гелия



в) 250 appm гелия



г) 500 appm гелия

Рис. 9. Поверхности изломов образцов из стали 12X18H10T после испытаний на растяжение при 873 К

Поверхность излома исходных образцов из стали 12X18H10T без гелия при испытании на растяжение характеризуется чашечной структурой, что указывает на транскристаллитный вязкий характер разрушения (рис. 9,а). Топография поверхности излома образцов с 75 appm гелия также говорит о транскристаллитном характере разрушения, однако излом носит смешанный характер – на поверхности присутствуют участки как чашечного излома, характерного для вязкого разрушения, так и участки хрупкого квазискола (рис. 9,б). При концентрации гелия 250 appm излом также имеет смешанный характер: чашечная структура + хрупкий квазискол, но доля хрупкой составляющей увеличивается (рис. 9,в). Разрушение образцов при концентрации гелия 500 appm носит хрупкий транс- и межкристаллитный характер (рис. 9,г).

## Заключение

Проблема гелиевой хрупкости КМ имеет важное значение в связи развитием атомной энергетики, особенно, термоядерной энергетики. В разрабатываемых реакторах синтеза, например, термоядерный реактор DEMO, по сравнению с реактором ITER возрастает воздействие потоков высокоэнергетических нейтронов, что увеличивает концентрацию гелия в КМ, а более высокие рабочие температуры дополнительно повышают риск гелиевого охрупчивания КМ.

При использовании КМ в условиях, когда в них возможно накопление гелия, следует учитывать следующие закономерности гелиевого охрупчивания

– С увеличением концентрации гелия гелиевое охрупчивание КМ усиливается, первые признаки появляются уже при небольших концентрациях гелия и отчетливо проявляются при концентрациях гелия  $\sim 10$  аppm.

– Пластичность КМ уменьшается с повышением температуры и уменьшением скорости деформирования. Наибольшее охрупчивание наблюдается при  $T_{исп} > 0,4 \dots 0,5 \cdot T_{пл}$  и при испытаниях на ползучесть.

– Предел текучести линейно зависит от концентрации гелия.

– Гелиевые пузырьки локализуются по границам зерен, а в теле зерен – на дислокациях и неметаллических включениях.

– Напряжения увеличивают плотность и средний размер пузырьков, расположенных на границах зерен, перпендикулярных направлению напряжений.

– Разрушение КМ с гелием имеет хрупкий, межкристаллитный характер.

## Список литературы

1. Schroeder H. High temperature embrittlement of metals by helium // Radiation Effects. 1983. Vol. 78. P. 297–314.
2. Ullmaier H. Introductory remarks Helium in metals // Ibid. P. 1–10.
3. Barnes R. S. Embrittlement of stainless steel and nickel-based alloys at high temperature induced by neutron radiation // Nature. 1965. 206(4991). P. 1307.
4. Канащенко С. Л., Городецкий А. Е., Захаров А. П. и др. Исследование структуры нержавеющей стали 12X18H10T // ВАНТ. Сер. Ядерный синтез. 2008. Вып. 2. С. 66–72.
5. 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.
6. Lovell A. J. // Nuclear Technology. 1972. Vol. 16. P. 323–331.
7. Bloom E. E. // Journal of Nuclear Materials. 1979. Vol. 85–86. P. 796–808.
8. Thomas G. J. // Experimental studies of helium in metals // Radiation Effects. 1983. Vol. 78. P. 37–51.
9. Юхимчук А. А., Апасов В. А., Виноградов Ю. И. и др. Комплекс газового обеспечения экспериментов по мюонному катализу ядерных реакций синтеза // Приборы и техника эксперимента. 1999, № 6. С. 17–23.
10. Юхимчук А. А., Лобанов В. Н. Система тритиевого обеспечения // Hyperfine Interaction. 1996. Vol. 101/102. P. 661–668.

11. Юхимчук А. А., Перевозчиков В. В., Тихонов В. И. и др. Сосуд для хранения изотопов водорода: Пат. РФ на изобретение № 2136064, МПК<sup>6</sup> G21 F9/02 // Бюллетень изобретений и полезных моделей № 24 от 27.08.99.
12. Robinson S. L., Moody N. R. // J. Nucl. Mater. 1986. 140. P. 245–251.
13. Caskey G. R. // Fusion Technology. 1985. Vol. 8, N 2. P. 2293–2298.
14. Малков И. Л., Златоустовский С. В., Клевцов В. Г. и др. Метод создания повышенной концентрации трития в конструкционных материалах // Сб. докл. Межд. семинара «Потенциал российских ядерных центров и МНТЦ в тритиевых технологиях». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2000. С. 39–42.
15. Малков И. Л., Клевцов В. Г., Юхимчук А. А. Применение метода «трیتیевого трюка» для ускоренного накопления гелия-3 в конструкционных материалах // Материаловедение. 2002, № 5. С. 34–37.
16. Malkov I. L., Yukhimchuk A. A., Zlatoustovskiy S. V. Calculated and Experimental Study of Metal Saturation with Helium-3. Fusion Science and Technology. Vol. 48. July/August 2005. P. 613–616.
17. Бойцов И. Е., Баурин А. Ю., Гришечкин С. К. и др. Механические свойства и водородостойкость стали 12X18H10T, содержащей до 500 аppm <sup>3</sup>He // Сб. аннотаций докладов научной сессии НИЯУ МИФИ-2010. Т. 2. М.: Типография НИЯУ МИФИ, 2010. С. 96.
18. Grishechkin S. K., Lebedev B. S., Yukhimchuk A. A. et al. Device for investigations of tritium retention in and permeation through metals and structural materials, Hydrogen Recycling at Plasma Facing Materials, NATO Science Series, II Mathematics, Physics and Chemistry, 2000. Vol. 1. P. 339–348.
19. Малков И. Л., Гришечкин С. К., Златоустовский С. В. и др. Получение образцов, содержащих <sup>3</sup>He, для исследования физико-механических свойств конструкционных материалов // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2008. Вып. 2. С. 72–79.
20. Basunov A. V., Boitsov I. E., Grishechkin S. K. et al. Physical and mechanical properties of structural materials in gaseous media containing hydrogen isotopes. Journal of the Moscow Physical Society (JMPS). 1999. Vol. 9. P. 237–243.
21. Бойцов И. Е., Балуев В. В., Гришечкин С. К. и др. Исследование влияния водорода высокого давления на механические свойства некоторых нержавеющих сталей в диапазоне температур от минус 80 °С до комнатной // Сб. докладов «IHISM'07». Саров, 2007. С. 302–308.
22. Бойцов И. Е., Гришечкин С. К., Glugla M. и др. Влияние радиогенного гелия на механические свойства и структуру стали 12X18H10T // Там же. С. 283–291.
23. Lasser R. Tritium and Helium -3 in Metals. Springer Verlag, 1989.
24. Caskey G. R. Tritium-Helium Effects in Metals // Fusion Technology. 1985. Vol. 8, N 2. P. 2293–2298.
25. Robinson S. L. Tritium and Helium Effects on Plastic Deformation in AISI 316 Stainless Steel // Materials Science and Engineering. 1987. Vol. 96. P. 7–16.
26. Физическое материаловедение. Вып. 3. Дефекты кристаллического строения, механические свойства металлов и сплавов / Под ред. Р. Кана. М.: Мир, 1968.
27. Материаловедение. Сталь. Т. 1. Кн. 1 / Под ред. М. Л. Берштейна. М.: Металлургия, 1995.