

03;05;12

## Влияние условий насыщения и структуры на удержание гелия в конструкционных материалах

© А.Г. Залужный, А.Л. Суворов

Институт теоретической и экспериментальной физики  
Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 25 апреля 2000 г.)

Проводится сравнение кинетики десорбции гелия при линейном нагреве образцов, насыщенных разными способами, а также оценивается роль дислокаций на удержание гелия в материалах. Для изучения влияния условий насыщения материалов гелием на его удержание исследовались образцы аустенитной нержавеющей стали ОХ16Н15М3Б, насыщенные разными способами: облучение на циклотроне и магнитной масс-сепарационной установке, реакторах ИРТ-2000 и БОР-60, а также насыщение гелием методом "третичного трюка".

Проведенные исследования показали, что при насыщении образцов гелием, обеспечивающим одновременное введение в решетку материала гелия и радиационных дефектов (в широких диапазонах концентрации гелия и радиационной повреждаемости), кинетика выделения гелия из образцов данного типа адекватна кинетике выделения гелия из образцов, облученных в реакторах.

Исследование кинетики выделения гелия из образцов стали ОХ16Н15М3Б как после их предварительной деформации, так и в процессе деформации показали, что в процессе нагрева атомы гелия могут мигрировать по трубкам дислокаций, оказывая существенное влияние на выход гелия и его перераспределение в объеме материала. Энергия активации диффузии атомов гелия по трубкам дислокации для аустенитной стали ОХ16Н15М3Б около 0.7 eV. Движущиеся дислокации могут способствовать выносу гелия на поверхность материала, границы зерен, межфазные границы.

### Введение

Известно, что под действием облучения материалы изменяют свои физические и механические свойства. Основными факторами, ограничивающими ресурс материалов, являются радиационное распухание, высокотемпературное и низкотемпературное радиационное охрупчивание, радиационная ползучесть и др. Большую роль в протекании этих нежелательных явлений играют газообразные продукты ядерных реакций, в том числе гелий.

Так как непосредственное облучение исследуемых материалов в реакторе требует значительного времени и материальных затрат, то для имитации накопления гелия в настоящее время используют различные экспрессные методы: облучение ионами гелия различных энергий, облучение высокоэнергетическими электронами и  $\gamma$ -квантами, насыщение из плазмы и др. Естественно, возникает вопрос, насколько та или иная методика годится для адекватного моделирования реакторного облучения. В данной работе предпринята попытка качественно сравнить кинетику десорбции гелия при линейном нагреве образцов, насыщенных разными способами, а также оценить роль дислокаций в удержании гелия в материалах.

### Экспериментальная часть

Исследование кинетики выделения гелия из образцов конструкционных материалов в процессе равномерного нагрева проводилось на высоковакуумной масс-спектрометрической установке [1]. Для изучения влия-

ния условий насыщения материалов гелием на его удержание исследовались образцы аустенитной нержавеющей стали ОХ16Н15М3Б, насыщенные разными способами. При моделировании влияния реакторного облучения на свойства материала недостаточно задавать определенные значения концентрации гелия и его распределение, необходимо также обеспечивать заданную характеристику подобия повреждаемости материала. Она определяется значением коэффициента  $K$ , который выражается отношением скорости образования гелия (He, аррм/с) к скорости создания смещения атомов (смещение на атом (с.н.а.)/с). Так, для ряда материалов в случае облучения на быстром реакторе EBR-II значения  $K = 0.3$  аррм/с.н.а., реактора HFIR —  $K = 70$  аррм/с.н.а. [2].

Для изучения влияния деформации на удержание гелия в стали ОХ16Н15М3Б проводилось исследование кинетики выделения гелия из недеформированных материалов, из материалов, подвергнутых предварительной холодной деформации (15% и 50%), и в процессе деформации.

### Экспериментальные результаты

1) Влияние условий насыщения на кинетику выделения гелия из материалов. С целью обоснования методов экспрессной имитации накопления и удержания гелия в конструкционных материалах при реакторном облучении был проведен сравнительный анализ спектров скорости газовой выделенности из образцов

Способ насыщения	Энергия	Температура, К	Флюенс, $m^{-2}$	Количество гелия, at%	К [2]
$(n, \alpha)$ [5]	Спектр ИРТ-2000	420	$2.0 \cdot 10^{24}$	$9.5 \cdot 10^{-4}$	400
$(n, \alpha)$ [5]	Спектр БОР-60	850	$3.8 \cdot 10^{26}$	$2.0 \cdot 10^{-3}$ $1.7 \cdot 10^{-3}$	0.6
He* [3]	0–29 MeV	400	$1.0 \cdot 10^{20}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$	4000
He* [4]	70 keV	400	$3.0 \cdot 10^{20}$	1.0	
$T \rightarrow {}^3\text{He}$ [6]		300		$5.0 \cdot 10^{-7}$	

стали ОХ16Н15МЗБ, облученной на циклотроне [3], магнитной масс-сепарационной установке ИЛУ-100 [4], реакторах ИРТ-2000 и БОР-60 [5], а также насыщенных гелием методом "третиего трюка" [6]. При облучении на циклотроне образцы насыщались гелием равномерно по объему до концентраций  $1 \cdot 10^3$  at.%. Температура облучения не превышала 400 К.

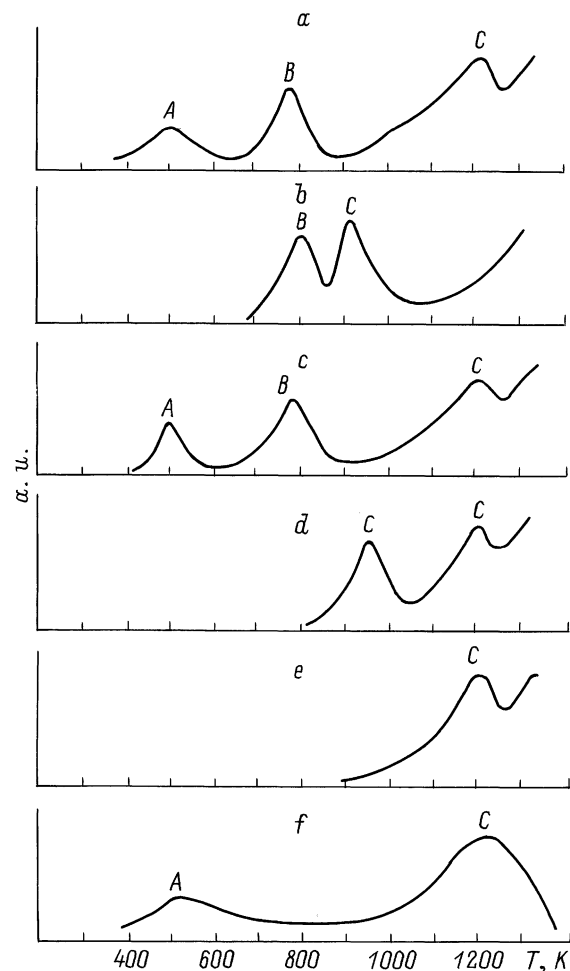
Насыщение образцов на магнитной масс-сепарационной установке ИЛУ-100 проводилось при бомбардировке исследуемого материала  $\alpha$ -частицами с энергией 70 keV, флюенсом  $3 \cdot 10^{20}$  ion/m<sup>2</sup>. Глубина пробега  $\alpha$ -частиц с такой энергией составляет около 200 nm. Температура облучения не превышала 400 К. Расчетная концентрация гелия в приповерхностном слое была около 1 at.%.

Облучение образцов на реакторе ИРТ-2000 проводилось при температуре до 420 К до флюенса быстрых нейтронов ( $E > 2.6$  MeV)  $1.1 \cdot 10^{23}$  n/m<sup>2</sup> и соответственно флюенса тепловых нейтронов  $2.6 \cdot 10^{24}$  n/m<sup>2</sup>. Экспериментально определенная концентрация гелия в облученных в реакторе ИРТ-2000 образцах составляла  $3.5 \cdot 10^{-4}$  at.%.

В качестве исследуемых образцов, облученных в реакторе БОР-60, были использованы образцы, вырезанные из оболочки твэл, набравшей флюенс  $7.8 \cdot 10^{26}$  n/m<sup>2</sup> ( $E > 0.1$  MeV). Температура облучения была около 850 К. Исследовались образцы как в исходном состоянии, так и со стравленным внутренним, контактировавшим с топливом, слоем. Экспериментально определенные концентрации гелия в данных образцах оказались равными  $2.0 \cdot 10^{-3}$  и  $1.7 \cdot 10^{-3}$  at.% соответственно. В таблице представлены характеристики исследуемых образцов.

На рис. 1 схематически представлены спектры скорости выделения гелия из исследовавшихся образцов в процессе равномерного нагрева со скоростью 7 K/min. На рис. 1, *a* представлен спектр выделения гелия из образца, облученного  $\alpha$ -частицами на циклотроне. Идентификация пиков приведенной кривой термодесорбции гелия дана в работе [7], в которой наряду с изучением кинетики выделения гелия проводились электронно-микроскопические исследования эволюции дислокационной структуры и развития гелиевой пористости: пик А (энергия активации  $E \approx 0.7$  eV) соответствует выделению гелия за счет диффузии атомов гелия по трубкам дислокаций, выходящих на поверхность; пик В ( $E \approx 0.8$  eV)

связан с ростом петель дислокаций, выходом их на поверхность и выделением связанного с ними гелия по дислокационным трубкам; пик С ( $E \approx 2.4$  eV) связывается с диффузией атомов гелия по вакансионному



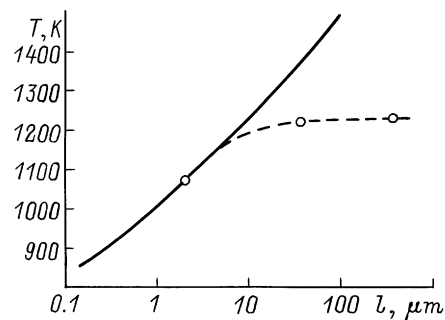
**Рис. 1.** Спектры скорости газовыделения при равномерном нагреве (7 K/min) образцов стали ОХ16Н15МЗБ, насыщенных гелием: *a* — равномерное по объему насыщение на циклотроне; *b* — облучение  $\alpha$ -частицами на масс-сепарационной установке (энергия ионов гелия 70 keV), *c* — облучение в реакторе ИРТ-2000; *d* — облучение в реакторе БОР-60 (исходное состояние); *e* — облучение в реакторе БОР-60 (удален поверхностный слой оболочки, контактировавший с топливом); *f* — насыщение по методу "третиего трюка".

механизму. Энергии активации выделения гелия при температурах, соответствующих пикам *A* и *C*, которые связаны с диффузией атомов гелия, рассчитывались по известной методике, основанной на нагреве образцов с различной скоростью [8]. Энергия активации выделения гелия при температуре, соответствующей пику выделения *B*, рассчитывалась из скорости роста петель междоузельных атомов [9]. Дальнейшее выделение гелия (при  $T > 1200$  К), возможно, связано с миграцией гелий-вакансионных комплексов  $\text{He}_x\text{V}_y$ . Данные выводы косвенно подтверждаются результатами последних работ по исследованию выделения и распределения гелия в материалах [10–12].

Следует отметить полную идентичность спектров скорости газовой выделенности из образцов, равномерно насыщенных гелием на циклотроне (рис. 1, *a*) и облученных в реакторе ИРТ-2000 (рис. 1, *c*).

Спектр скорости газовой выделенности из образца, облученного  $\alpha$ -частицами с энергией 70 keV, характеризуется пиками *B* и *C* (рис. 1, *b*). Отсутствие пика *A*, возможно, связано с реализацией данного процесса уже при облучении образца из-за приповерхностного распределения гелия. С приповерхностным распределением гелия связан и сдвиг пика *C* в сторону низких температур [13].

Спектры скорости выделения гелия из образцов стали ОХ16Н15МЗБ, облученных в реакторе БОР-60 (рис. 1, *d* и *e*), характеризуются выделением гелия только при высоких температурах, превышающих температуру облучения. Это обусловлено, вероятно, реализацией процессов, ответственных за газовой выделенности при более низких температурах, во время облучения. Газовой выделенности, соответствующее исходному образцу (рис. 1, *d*), характеризуется двумя пиками с максимумами скорости выделения при 940 и 1200 К, в то время как в спектре скорости выделения гелия из образца со сравненным внутренним слоем (рис. 1, *e*) присутствует один пик при температуре 1200 К. Такая разница в кинетике выделения гелия из данных образцов объясняется разным исходным распределением гелия в материале. Так, у исходного образца внутренний слой обогащен гелием за счет внедрения  $\alpha$ -частиц из топлива. В образце со сравненной внутренней поверхностью гелий равномерно распределен по объему образца. Пики на кривой термодесорбции гелия из исходного образца соответствуют одному и тому же механизму диффузии гелия по вакансиям: первый пик связан с выходом гелия из приповерхностного слоя, второй — из всего объема образца. На рис. 2 представлена рассчитанная на основании работы [13] зависимость температуры максимума скорости газовой выделенности, соответствующего диффузии гелия по вакансионному механизму, при линейном нагреве образца со скоростью 7 К/мин от толщины  $l$  насыщенного гелием приповерхностного слоя, определяющего газовой выделенности на данной стадии. Из сопоставления данных, приведенных на рис. 2, с температурами максимумов скорости газовой выделенности (рис. 1, *d* и *e*), следует, что толщина насыщенного приповерхностного слоя в исходном образце около  $0.5 \mu\text{m}$ , что по порядку



**Рис. 2.** Зависимость температуры максимума скорости газовой выделенности гелия по вакансионному механизму при линейном нагреве образца (7 К/мин) от толщины насыщенного гелием приповерхностного слоя (сплошная кривая, расчет), от размера зерна (штриховая, эксперимент).

величины согласуется с пробегом  $\alpha$ -частиц, внедренных из топливной композиции, в стали [14]. Газовой выделенности с максимумом при температуре 1200 К, контролируемое выделением гелия из объема образца, соответствует толщине образца приблизительно  $10 \mu\text{m}$ , что согласуется со средним размером зерна в исследуемых образцах. В работе [15] было показано, что границы зерен являются не насыщенными ловушками для инертных газов. Следовательно, выделение инертных газов из материалов происходит лишь из приповерхностных зерен материала. На рис. 2 приведена экспериментальная кривая зависимости температуры максимума скорости выделения гелия из равномерно насыщенных на циклотроне газом образцов с разным размером зерна. Из данной зависимости можно сделать вывод, что выделение гелия из облученных материалов происходит только из приповерхностного слоя образца (в данном случае толщина этого слоя порядка  $10 \mu\text{m}$ ), остальной гелий, по всей вероятности, улавливается на внутренних ловушках (границы раздела, дислокации, радиационные дефекты и др.).

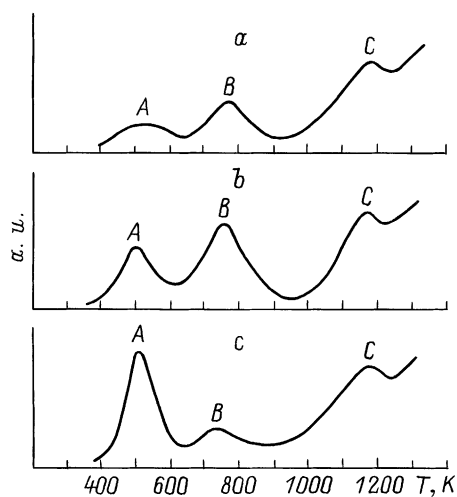
На рис. 1, представлена кривая скорости выделения гелия из образца, насыщенного по методу "третий трюк". Данная кривая термодесорбции имеет два пика, которым соответствует энергия активации 0.7 и 2.4 эВ. Это говорит о том, что в случае насыщения гелием материала бездефектным способом, каковым и является "третий трюк", оставшиеся в материале за время насыщения атомы газа связаны в основном с дислокациями и вакансиями. Отсутствие заметного выделения гелия при температурах выше  $0.85 T_{\text{mol}}$  указывает на отсутствие стабильных гелий-вакансионных комплексов.

Таким образом, можно заключить, что в отношении поведения гелия в конструкционных материалах имитационные эксперименты, обеспечивающие одновременное введение в решетку материала гелия и радиационных дефектов (в широких диапазонах концентрации гелия и радиационной повреждаемости), достаточно адекватно воспроизводят реакторное облучение. По всей вероятности, это обусловлено стабилизацией определенных

конфигураций радиационных дефектов атомами гелия. При введении гелия бездефектными способами в каждом случае необходимо учитывать особенности его удержания и подвижности. Игнорирование этих особенностей может привести к некорректной трактовке полученных результатов. Получено, что выделение гелия при линейном нагреве облученных образцов начинается лишь при температурах, превышающих температуры облучения. Данное обстоятельство может быть использовано для определения температуры облучения образцов.

2) Влияние деформации на удержание гелия в материалах. Исследование влияния деформации на удержание гелия в материалах проводилось на образцах стали ОХ16Н15М3Б, равномерно насыщенных газом в результате бомбардировки ионами гелия на циклотроне [3] до концентрации  $1 \cdot 10^{-3}$  at%. Температура облучения не превышала 400 К. Исследовались образцы в аустенизированном состоянии и после предварительной 15- и 50%-ной холодной деформации. Непосредственно перед экспериментом образцы размером  $5.0 \times 5.0 \times 0.1$  mm подвергались электрополировке с последующей промывкой в спирте для очистки поверхности.

На рис. 3 представлены кривые десорбции гелия в процессе равномерного нагрева со скоростью 7 К/мин из аустенизированных и предварительно деформированных образцов. Из приведенного рисунка видно, что в случае деформированных образцов (рис. 3, *b, c*) увеличивается низкотемпературный пик А, который связывается с выходом гелия на поверхность образца по трубкам дислокаций. Пик А увеличивается тем больше, чем больше величина предварительной деформации. Несколько уменьшается пик В, связанный с выходом на поверхность образца петель дислокаций в процессе их роста и последующим выходом по дислокациям атомов гелия.



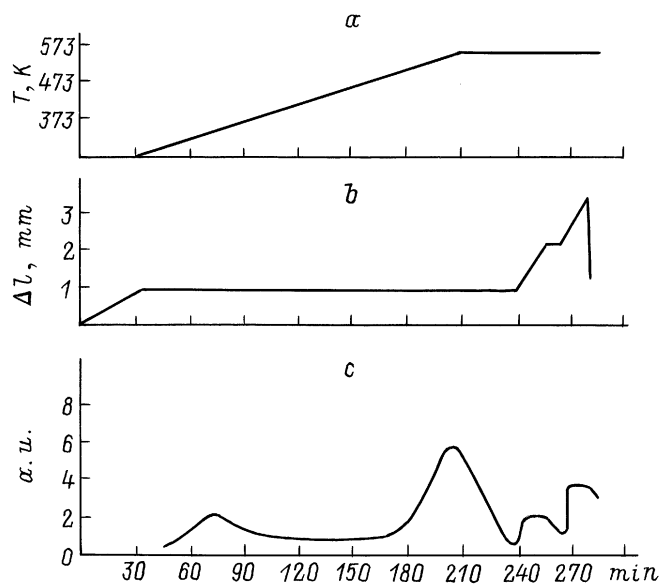
**Рис. 3.** Спектры скорости газовыделения при равномерном нагреве образцов (7 К/мин), насыщенных гелием на циклотроне: *a* — исходный, *b* — предварительная холодная деформация на 15%, *c* — предварительная холодная деформация на 50%.

Следует отметить, что в данном температурном интервале наблюдалось также значительное выделение азота и небольшого количества других химически активных газов, что, вероятно, связано с рассасыванием атмосфер Коттрелла в процессе выхода петель дислокаций на поверхность образца при их росте. Причем вклад этого процесса в выделение гелия из образцов стали при нагреве уменьшается, как и следовало ожидать, с увеличением величины предварительной деформации (с увеличением плотности дислокаций).

Одновременно проводилось определение абсолютных количеств гелия, выделившегося в процессе изохронных отжигов исследуемых образцов (продолжительность отжигов 0.5 h), методом испарения образца в вакууме с последующей масс-спектрометрической регистрацией выделившегося гелия [5]. Данные исследования показали, что на низкотемпературной стадии гелия выделяется тем больше, чем больше предварительная деформация образцов. Суммарное же количество гелия, выделившегося в процессе изохронных отжигов до температуры 1373 К, примерно одинаково для всех образцов. Полученные результаты еще раз подтверждают сделанное нами предположение, что выделение гелия при температуре  $0.27-0.3 T_{\text{mol}}$  связано с миграцией атомов гелия по трубкам дислокаций. Так как чем больше деформация, тем большее количество дислокаций выходит на поверхность материала, тем большее количество газа, диффундирующего по трубкам дислокаций, выделяется из образца.

Для дальнейшего выявления роли дислокаций на удержание гелия в материалах исследовалось выделение гелия из образцов стали ОХ16Н15М3Б в процессе деформации при температурах 543 К. Эта температура соответствует низкотемпературному пику выделения гелия, который связывается нами с миграцией атомов гелия по трубкам дислокаций. Для этой цели на крышке отжиговой камеры высоковакуумной масс-спектрометрической установки для исследования кинетики газовыделения [1] было сконструировано специальное устройство, позволяющее проводить деформацию образцов с разными скоростями ( $10^{-5}-10^{-3}$  s $^{-1}$ ). Образцы для исследования вырубались штампом из листа толщиной 0.3 mm. Длина образцов 100 mm, ширина 4 mm. Насыщение гелием проводилось облучением  $\alpha$ -частицами на циклотроне [3]. Температура облучения не превышала 400 К. Концентрация гелия составляла  $10^{-3}$  at%.

Схема эксперимента заключалась в следующем. Сначала образец нагревался до температуры испытания (543 К) и выдерживался при этой температуре до прекращения выделения гелия. Затем проводилась деформация образца со скоростью  $10^{-3}$  s $^{-1}$ . Выделение гелия было зарегистрировано только в момент разрушения образца. Количество выделившегося гелия было очень незначительно, на уровне чувствительности методики, и связано, скорее всего, с его выделением с поверхности разрушения. Результаты данного эксперимента дают возможность сделать только вывод о низкой вероятности взаимодействия движущихся дислокаций с атомами



**Рис. 4.** Деформационное выделение гелия из образцов стали OX16N15M3B в процессе нагрева: *a* — изменение температуры, *b* — удлинение образца, *c* — скорость десорбции гелия.

гелия, которые после облучения материала ионами гелия на ускорителе и предварительной изотермической выдержке при температуре 543 К, находятся, вероятнее всего, в радиационных вакансиях, которые в этих условиях являются основными стоками для внедренных атомов гелия. Предполагая, что междуузельные атомы гелия более эффективно взаимодействуют с дислокациями, была предпринята попытка "посадить" их на дислокации, предварительно до нагрева продеформировав облученный образец при комнатной температуре. В этом случае междуузельные атомы гелия при последующем нагреве могут осесть на дислокациях, что в свою очередь должно отразиться на кинетике его выделения из образца. Такой эксперимент был проведен следующим образом. Облученный образец закреплялся в захватах в отжиговой камере и проводилось его деформирование со скоростью  $5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Затем осуществлялся линейный нагрев со скоростью 1.5 K/min до температуры 543 К, при которой наблюдалась стадия газовой выделенности, связываемая нами с миграцией атомов гелия вдоль дислокаций, выдержка при этой температуре до прекращения газовой выделенности и затем деформирование с различными скоростями вплоть до разрушения образца. В процессе всего эксперимента проводилась регистрация изменения парциального давления выделившегося гелия в экспериментальном объеме установки. Результаты исследования приведены на рис. 4. Видно, что деформирование при комнатной температуре не сопровождается выделением гелия. Дальнейший подъем до температуры 543 К приводит к незначительному газовой выделению. Энергия активации этого процесса, рассчитанная по известной методике нагрева образца с разными скоростями,  $E = 0.2 \text{ eV}$  [8], что дает основание предположить, что данный пик выделения

связан с выходом гелия из материала в результате диффузии его атомов по междуузельному механизму [16]. Это связано с тем, что после облучения часть атомов гелия все еще находится в междуузельях. После остановки нагрева в течение 30 min изотермической выдержки наблюдается газовой выделение, которое можно связать с диффузией атомов гелия по дислокационным трубкам. Дальнейшее деформирование со скоростью  $5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  в течение 20 min сопровождалось выделением гелия практически с постоянной скоростью. При прекращении деформирования скорость газовой выделенности резко уменьшалась. Увеличение скорости деформирования в два раза приводило к увеличению скорости газовой выделенности. Увеличение газовой выделенности при разрушении образца зарегистрировано не было.

Полученные результаты дают основание предположить как о возможной диффузии атомов гелия по трубкам дислокаций, так и о возможном выносе атомов гелия на поверхность образцов движущимися дислокациями.

Исходя из того, что деформирование образцов стали OX16N15M3B приводит к увеличению выхода гелия из материалов, можно сделать предположение, что деформация при этих температурах может способствовать выносу гелия на границы зерен при температурах, более низких, чем характерные температуры для высокотемпературного радиационного охрупчивания. Это может привести к деградации механических характеристик материалов в случае термомеханических нагрузок в условиях генерации и внедрения атомов гелия в поверхность материалов в сочетании с импульсным температурным воздействием, например, при срывах плазмы в термоядерных реакторах.

Подтверждением возможности диффузии атомов гелия по трубкам дислокаций являются результаты работы [17], в которой проводилось, в частности, исследование влияния знакопеременных нагрузок на кинетику выделения гелия из сплава А7 (алюминий чистотой 99.7%). Было получено, что при воздействии на материал знакопеременных нагрузок (поперечный изгиб образца с частотой 1 Hz) в упругой области (рассчитанные по величине прогиба образца напряжения составляли  $\pm 0.6, \pm 1.2, \pm 1.8, \pm 2.4 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ ) низкотемпературный пик выделения гелия ( $\sim 400 \text{ K}$ ) при равномерном нагреве образца смещается в сторону более низких температур, чем в отсутствие нагрузки. Причем чем больше нагрузка, тем больше смещение. В то же время с ростом уровня напряжений возрастает и интенсивность вывода гелия в этом интервале температур. Наблюдаемые изменения кинетики газовой выделенности с увеличением уровня механических напряжений связываются с тем, что при циклических механических нагрузках захват гелия дислокацией осуществляется не только при случайном блуждании атомов гелия, но и за счет сближения их с дислокацией при ее прогибе. С увеличением внешней нагрузки стрела прогиба дислокации увеличивается, тем самым возрастает вероятность захвата ею атомов гелия

и вынос их на поверхность образца. С ростом нагрузки возрастает абсолютное количество гелия, реэмиссия которого осуществляется по дислокациям.

## Заключение

Результаты исследования влияния условия введения атомов гелия в решетку материала на кинетику газовой выделенности показали, что в отношении поведения гелия в конструкционных материалах имитационные эксперименты, обеспечивающие одновременное введение в решетку материала гелия и радиационных дефектов (в широких диапазонах концентрации гелия и радиационной повреждаемости), достаточно адекватно воспроизводят реакторное облучение. По всей вероятности, это обусловлено стабилизацией определенных конфигураций радиационных дефектов атомами гелия. В случае введения гелия бездефектными способами в каждом случае необходимо учитывать особенности его удержания и подвижности. Игнорирование этих особенностей может привести к некорректной трактовке полученных результатов. Тот факт, что выделение гелия при нагреве облученных образцов начинается лишь при температурах, превышающих температуры облучения, может быть использован для определения температуры облучения.

Исследование кинетики выделения гелия из образцов стали ОХ16Н15М3Б как после их преварительной деформации, так и в процессе деформации показало, что в процессе нагрева атомы гелия могут мигрировать по трубкам дислокаций, оказывая существенное влияние на выход гелия и его перераспределение в объеме материала. Энергия активации диффузии атомов гелия по трубкам дислокации для аустенитной стали ОХ16Н15М3Б около 0.7 eV. Движущиеся дислокации могут способствовать выносу гелия на поверхность материала, границы зерен, межфазные границы.

## Список литературы

- [1] *Zaluzhnyi A.G., Kopitin V.P., Cherednichenko-Alchevskiy M.V.* Fusion Engineering and Design. ISFNT-4. 1998. Vol. 41. Pt B. P. 129–134.
- [2] *Зеленский В.Ф., Неклюдов И.М., Черняева Т.П.* Радиационные дефекты и распускание материалов. Киев: Наукова думка, 1988. 293 с.
- [3] *Реутов В.Ф., Ибрагимов Ш.Ш.* А.с. № 531433. БИ. 1978. № 23. 223 с.
- [4] *Залужный А.Г., Сокурский Ю.Н., Агапова Н.П.* и др. // Атомная энергия. 1976. Т. 40. Вып. 6. С. 490–491.
- [5] *Залужный А.Г., Чередниченко-Алчевский М.В., Сторожук О.М.* // Атомная энергия. 1982. Т. 52. Вып. 6. С. 398–400.
- [6] *Арбузов В.Л., Вотинов С.Н., Григорьян А.А.* и др. // Атомная энергия. 1983. Т. 55. Вып. 4. С. 214.
- [7] *Залужный А.Г., Сторожук О.М., Чередниченко-Алчевский М.В.* Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 1988. Вып. 2 (44). С. 79–91.
- [8] *Карасев В.С., Швед Г.Ф., Гребенников Р.В.* и др. // Атомная энергия. 1973. Т. 34. Вып. 4. С. 251–254.
- [9] *Скоров Д.М., Агапова Н.П., Залужный А.Г.* и др. // Атомная энергия. 1976. Т. 40. Вып. 5. С. 387–390.
- [10] *Zhang C.H., Chen K.Q., Wang Y.S., Sun J.G.* // Fusion Reactor Materials VIII. Pt B. 1999. P. 1621–1627.
- [11] *Ryazanov A., Matsui H., Kazaryan A.* Fusion Reactor Materials VIII. Pt C. 1999. P. 356–359.
- [12] *Matsui H., Tanaka M., Yamamoto M., Tada M.* // J. Nucl. Mat. 1992. Vol. 919. P. 191–194.
- [13] *Жолнин А.Г., Залужный А.Г.* // Поверхность. 1986. № 10. С. 33–40.
- [14] *Абдарашистов И.Ю., Ботвин К.В., Ибрагимов Ш.Ш.* и др. Препринт ИЯФ АН КазССР. № 2-80. Алма-Ата, 1980.
- [15] *Залужный А.Г., Чередниченко-Алчевский М.В., Сторожук О.М., Жолнин А.Г.* // Атомная энергия. 1984. Т. 56. Вып. 5. С. 314.
- [16] *Charsughi F.* Degree Thesis. Jül-2652. Jülich (Germany): Institut für Festkörperforschung, 1992.
- [17] *Залужный А.Г., Комиссаров А.П., Махлин Н.А.* и др. // Поверхность. 1983. № 6. С. 51–54.