

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 669.15-194.56:621.039.548.34

Анализ влияния вида напряженного состояния на радиационное распухание и радиационную ползучесть аустенитных сталей

Б. З. Марголин^а, А. И. Мурашова^а, В. С. Неустроев^б

^а ФГУП ЦНИИ КМ “Прометей”, Санкт-Петербург, Россия

^б ОАО “ГНЦ НИИАР”, Димитровград, Россия

Представлены результаты анализа экспериментальных данных по оценке влияния вида напряженного состояния на радиационное распухание аустенитных сталей. Сформулировано определяющее уравнение, позволяющее описывать влияние объемного напряженного состояния на распухание аустенитных сталей с учетом различных вкладов шаровой и девиаторной компонент напряжений. Предложена физическая интерпретация полученной зависимости радиационного распухания от напряженного состояния. Уточнена зависимость радиационной ползучести от распухания с учетом напряженного состояния. Определены значения коэффициентов, входящих в сформулированное определяющее уравнение и в зависимость радиационной ползучести.

Ключевые слова: напряженное состояние, радиационное распухание, аустенитные стали, радиационная ползучесть.

Введение. Известно, что внутрикорпусные устройства (ВКУ) реакторов на медленных нейтронах типа ВВЭР и на быстрых нейтронах типа БН, изготавливаемые из аустенитных хромоникелевых сталей, подвергаются интенсивному нейтронному облучению. Максимальная температура облучения ВКУ ВВЭР-1000 может превышать 400°С [1], ВКУ реакторов типа БН – 550°С [2]. Для ВКУ ВВЭР-1000 за срок эксплуатации 60 лет максимальная повреждающая доза достигает 100 сна [1], для ВКУ БН-600 за 45 лет она выше 50 сна [2]. При указанных повреждающих дозах и температурах облучения аустенитные стали претерпевают радиационное распухание, что может приводить к значительной деградации материала, например снижению пластичности и трещиностойкости [3–8], а также реализации $\gamma \rightarrow \alpha$ -фазового превращения, вызывающего резкое охрупчивание материала [3–6]. Кроме того, распухание способствует изменению размеров элементов ВКУ и, как следствие, возможному нарушению их нормального ориентирования.

Ввиду неравномерной температуры и неоднородности облучения различные зоны элемента ВКУ подвергаются разному распуханию. Градиент распухания приводит к существенным внутренним напряжениям в элементах ВКУ. При нормальном режиме эксплуатации реактора напряжения от распухания и

термические напряжения являются основными рабочими напряжениями, приводящими к повреждению элемента ВКУ, так как напряжения от массовых нагрузок очень малы, а напряжения от различного рода динамических нагрузок при рассматриваемом режиме не возникают.

Как было отмечено выше, материал в составе элемента ВКУ распухает в стесненных условиях, порождающих напряжения. Возникает вопрос, как влияют напряжения на распухание материала. Для его решения многие исследователи проводили эксперименты по определению распухания газонаполненных трубок под давлением, облучаемых в реакторе [9–18]. Для определения влияния, собственно, напряжений на распухание одновременно с газонаполненными трубками облучению подвергали трубки без давления.

Результаты обработки такого рода экспериментов позволили получить зависимость в виде [11–17]

$$S = S_0 \left(1 + P_1 \frac{\sigma_\theta}{2} \right), \quad (1)$$

где S – распухание при наличии растягивающих окружных σ_θ и осевых напряжений (в трубе $\sigma_z = \sigma_\theta/2$); S_0 – распухание при отсутствии напряжений, так называемое свободное распухание; P_1 – константа материала, в общем случае зависящая от температуры облучения.

Из уравнения (1) следует, что растягивающие напряжения увеличивают распухание. О том, как влияют сжимающие напряжения на распухание, эксперименты с газонаполненными трубками не дают никакого ответа. В то же время делается предположение, что на распухание влияет гидростатическая компонента напряжений σ_m . Для газонаполненных трубок имеем $\sigma_m = \sigma_\theta/2$. Именно поэтому в формуле (1) в качестве параметра, характеризующего напряжения в материале, используется величина $\sigma_\theta/2$.

Закономерности распухания аустенитных сталей в нестесненных условиях, т.е. при отсутствии напряжений, достаточно хорошо изучены [19–33]. Получены уравнения, описывающие свободное распухание (без напряжений) от повреждающей дозы и температуры облучения [22–34]. В частности, ранее [34] на основании обобщения большой базы экспериментальных данных такие уравнения получены для сталей типа X18H9 и 08X18H10T.

В настоящее время известно очень мало экспериментальных работ, посвященных исследованию влияния знака напряжений на распухание. В некоторых из них сделан вывод, что знак напряжений не влияет на радиационное распухание материала, т.е. ускорение распухания наблюдается как при растягивающих, так и сжимающих напряжениях [35–37]. Например, в [37] исследовали образцы в виде пластин, которые предварительно подвергались изгибу и затем облучались в реакторе EBR-II. При облучении были зафиксированы перемещения, приводящие к изгибу пластин. Полученные результаты показали, что радиационное распухание материала пластины со стороны сжатия и со стороны растяжения было одинаковым, но большим, чем в ненагруженном материале. Установлено [37], что на распухание влияет только уровень напряжений, а их знак не влияет. Такое заключение, с нашей точки зрения, связано

с некорректной трактовкой экспериментальных данных. В действительности при наличии градиента распухания по толщине пластины происходит перераспределение напряжений в процессе облучения. Дополнительное изменение напряжений при распухании возникает вследствие изменения нагрузок в местах фиксации перемещений в процессе облучения. Ранее [34] были оценены напряжения, действующие в пластине к концу облучения. В качестве исходной информации заданы распределения распухания по толщине пластины. Расчеты показывают, что перераспределение напряжений могло быть столь существенным, что напряжения у поверхности обеих сторон пластины стали практически одинаковыми и сжимающими.

Таким образом, экспериментальные результаты, полученные на образцах, в которых напряжения изменяются при распухании материала, весьма сложно интерпретировать.

Тем не менее в настоящее время существуют две гипотезы о влиянии напряжений на распухание. Первая – предполагает, что знак напряжений влияет на распухание, вторая – что знак не влияет, а влияет только абсолютный уровень напряжений. Используя ту или иную гипотезу, можно получить принципиально различную картину напряженного состояния распухания элемента ВКУ.

Рассмотрим в качестве примера толстостенный элемент ВКУ ВВЭР-1000 – выгородку реактора, представляющую собой толстостенную обечайку. За счет γ -нагрева наибольшая температура облучения в выгородке будет в толще металла, $T_{\text{обл}} \cong 400^\circ\text{C}$. По мере приближения к поверхности обечайки температура уменьшается до 320°C [1]. В месте максимума температур реализуется максимальное распухание, что приводит к возникновению сжимающих напряжений. Ближе к поверхности обечайки возникают растягивающие напряжения.

Если распухание происходит согласно первой гипотезе, в области сжимающих напряжений темп распухания будет падать, в области растягивающих – увеличиваться. В результате при заданной дозе градиент распухания по толщине обечайки и уровень напряжений будут меньше, чем если бы напряжения не влияли на распухание.

Если распухание происходит согласно второй гипотезе, то появление напряжений приведет к увеличению темпа распухания и, как следствие, к еще большим напряжениям. В результате при заданной дозе градиент распухания и уровень напряжений будут больше, чем при отсутствии влияния напряжений на распухание.

Как видно, закон влияния напряжений на распухание играет существенную роль в оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов ВКУ.

Известна работа [38], содержащая ценнейшие экспериментальные данные по оценке влияния различного вида напряженного состояния на радиационное распухание стали 304L. Эксперименты поставлены таким образом, чтобы при распухании материала напряженное состояние образца не менялось. В [39] предложена система определяющих уравнений для расчета НДС элементов конструкций, достаточно хорошо описывающая экспериментальные данные, представленные в [38].

К сожалению, использовать эту систему весьма сложно, в первую очередь из-за большого количества параметров, которые экспериментально определяются при проведении внутриреакторных испытаний, а также необходимости определения значений некоторых коэффициентов (например, “plastic Poisson’s ratio”) как функций микроструктурных параметров облученного материала. Причем эти параметры зависят от дозы и температуры облучения.

Целью настоящей работы является определение зависимостей, описывающих влияние вида напряженного состояния на радиационное набухание аустенитных сталей на основе анализа и обобщения имеющихся в [38] и других работах экспериментальных данных и радиационную ползучесть аустенитных сталей.

1. Постановка задачи. При анализе влияния напряжений на набухание возникает вопрос, в каком виде представлять напряжения в случае неоднородного напряженного состояния.

Как известно, напряжение – тензорная величина, набухание – скалярная. Следовательно, на набухание влияют могут скалярные инварианты тензора напряжений. Два из них имеют ясный физический смысл: гидростатическое напряжение σ_m и интенсивность напряжений σ_{eq} .

В связи с изложенным при исследовании влияния напряжений на набухание любое напряженное состояние целесообразно представлять двумя параметрами: σ_m и σ_{eq} .

Ясно, что в первой гипотезе в качестве основного и единственного параметра рассматривается σ_m , во второй – σ_{eq} .

В общем случае влияние напряжений на набухание может выражаться в виде функции влияния от двух параметров: $f(\sigma_m, \sigma_{eq})$.

Следующим моментом является выбор вида уравнения, описывающего влияние напряжений на набухание. С нашей точки зрения, для построения простой модели уравнение может быть принято в виде, аналогичном (1):

$$S = S_0(1 + Pf(\sigma_m, \sigma_{eq})), \quad (2)$$

где P – константа материала.

2. Анализируемые экспериментальные данные. Анализируемые данные по оценке влияния напряжений на радиационное набухание были получены при облучении образцов в экспериментальном ядерном реакторе-размножителе EBR-II в 1977–1979 гг. в рамках национальной программы США. Однако из-за сокращения финансирования и свертывания программы эти данные не приводились в открытой литературе вплоть до 2010 г. [38].

Влияние напряжений на набухание S исследовали на предварительно облученных трубчатых образцах из отожженной стали 304L. Предварительное облучение было необходимо для достижения установившегося набухания, при котором скорость набухания $\Delta S/\Delta D$ можно рассматривать в качестве константы, не зависящей от дозы D , начиная с 13,5 сна [38]. Химический состав образцов (вес.%) [38] следующий: 1,66 Mn; 0,016 P; 0,014 S; 0,59 Si; 10,6 Ni; 18,3 Cr; <0,01 Ti; 0,02 Mo; 0,03 C (Cu и Co отсутствуют).

Образцы были сконструированы таким образом, что при их набухании уровень действующих напряжений не изменялся. Три одноосных и три двух-

осных напряженных состояния исследуемых трубчатых образцов создавались внутренним давлением и осевой силой [38]. В качестве обозначения вида напряженного состояния использовали отношение окружного напряжения образца к осевому напряжению (например, 0/1 – осевое растяжение: действует только осевое напряжение, а окружное равно нулю).

Вместе с образцами под напряжением повторному облучению подвергали предварительно облученные образцы без напряжений для определения свободного распухания S_0 . Предварительное облучение всех образцов проводили при температурах, называемых далее начальными, $T_H = 438...497^\circ\text{C}$ до доз (начальные) $D_H = 16,3...34,1$ сна.

В табл. 1 приведены следующие параметры эксперимента по определению радиационного распухания и радиационной ползучести образцов под напряжением: тип напряженного состояния; номер образца; скорость набора дозы dD/dt ; начальная доза D_H (набранная образцом без напряжений при предварительном облучении); прирост дозы ΔD (прирост дозы за время повторного облучения образцов под напряжением); начальная температура повторного облучения (равна температуре предварительного облучения) T_H ; конечная температура повторного облучения T_K ; интенсивность напряжений σ_{eq} и гидростатическое напряжение σ_m в образцах. Там же представлены результаты эксперимента: относительное изменение длины $\Delta L/L$ и диаметра образцов $\Delta d/d$; начальное S_H и конечное S_K полное распухания образцов; отношение изменения полного распухания к изменению дозы $\Delta S/\Delta D$; отношение изменения распухания, вызванного напряжениями, к изменению свободного распухания за один и тот же прирост дозы $\Delta S_\sigma/\Delta S_0$. Распухание, вызванное напряжениями, будет $S_\sigma = S - S_0$. Начальное полное распухание S_H получено после предварительного облучения образцов (в отсутствие напряжений), конечное полное распухание S_K измеряли после повторного облучения образцов (под действием напряжений). Для определения вызванного напряжениями приращения распухания ΔS_σ из конечного полного распухания S_K вычитали свободное распухание образца после повторного облучения $S_{0к}$, т.е. $\Delta S_\sigma = S_K - S_{0к}$. Приращение свободного распухания ΔS_0 вычисляли по формуле $\Delta S_0 = S_{0к} - S_H$. В двух последних колонках табл. 1 представлены нормированные по ΔS_0 значения изменения осевой $\Delta e'_L/\Delta S_0$ и окружной $\Delta e'_d/\Delta S_0$ девиаторной компоненты деформации ползучести ($\Delta e'_L/\Delta S_0$ и $\Delta e'_d/\Delta S_0$ соответственно).

Распухание измеряли методом гидростатического взвешивания.

Следует отметить, что изменение температуры в процессе повторного облучения в нагруженных образцах и образцах без напряжений было практически идентичным. Поэтому различие в приращении распухания в этих образцах за время повторного облучения может быть вызвано исключительно влиянием напряжений, а не температуры облучения.

При измерении диаметра облученных образцов обнаружено, что полученные значения существенно отличаются от среднего, что обусловлено взаимодействием образцов с проволоочной оберткой, отделяющей их от капсулы, в которой их облучали. Типичное отклонение значений диаметра через 20° на каждой из четырех осевых позиций, на которые условно была разбита длина образца, составляет 0,072 мм, или 0,94% среднего значения диаметра, в

то время как типичное отклонение значений длины – 0,0063 мм, или 0,082% среднего значения длины. Типичные значения 2σ -отклонений составляют: 0,016 для окружной деформации, 0,00081 для осевой деформации и 0,00049 для распухания [38].

Т а б л и ц а 1

Параметры и результаты эксперимента по определению радиационного распухания и радиационной ползучести образцов под напряжением для различных видов напряженного состояния [38]

Тип напряженного состояния	№ образца	dD/dt , 10^{-7} сна/с	D_n , сна	ΔD , сна	T_n , °C	T_k , °C	σ_{eq} , МПа	σ_m , МПа
1/-1	21	2,43	26,1	3,99	459	535,5	147,3	-2,50
1/-1	22	3,79	22,5	6,22	486	551,7	53,3	-0,91
1/-1	23	3,37	20,0	5,53	489	546,6	53,0	-0,90
2/1	31	3,45	23,3	5,66	475	549,2	60,1	30,74
2/1	32	2,88	21,1	4,72	438	514,7	113,8	58,24
0/1	42	3,87	22,6	6,34	489	554,4	57,0	19,00
0/1	43	3,87	19,0	6,34	490	557,5	57,2	19,07
1/0	62	3,45	29,3	5,66	460	538,5	148,4	47,08
0/-1	51	3,12	30,2	5,11	490	542,9	152,3	-50,76
0/-1	52	3,37	28,0	5,53	463	546,6	56,5	-18,82
0/-1	53	3,37	23,7	5,53	497	535,9	55,7	-18,57
0/-1	55	3,12	25,1	5,11	490	525,4	108,3	-36,09
1/1	71	3,27	33,6	5,36	455	548,3	87,1	52,08
1/1	72	3,53	30,7	5,78	481	541,2	43,9	26,27

Тип напряженного состояния	№ образца	$\frac{\Delta L}{L}$	$\frac{\Delta d}{d}$	S_n	S_k	$\frac{\Delta S}{\Delta D}$, сна ⁻¹	$\frac{\Delta S_\sigma}{\Delta S_0}$	$\frac{\Delta \epsilon_L}{\Delta S_0}$	$\frac{\Delta \epsilon_d}{\Delta S_0}$
1/-1	21	-0,00153	0,00822	0,0683	0,0793	0,00275	0,3717	-0,6484	0,5701
1/-1	22	0,00332	0,00800	0,0479	0,0650	0,00275	0,0805	-0,1541	0,1479
1/-1	23	0,00382	0,00699	0,0290	0,0454	0,00296	0,1644	-0,1141	0,1070
2/1	31	0,00555	0,00741	0,0468	0,0634	0,00294	0,4623	0,0105	0,1637
2/1	32	0,00690	0,01001	0,0393	0,0593	0,00425	1,4693	0,0263	0,4094
0/1	42	0,01074	0,00411	0,0488	0,0716	0,00360	0,3861	0,1900	-0,2125
0/1	43	0,00937	0,00335	0,0272	0,0447	0,00276	0,2852	0,2600	-0,1823
1/0	62	0,00796	0,02118	0,0863	0,1155	0,00517	1,4688	-0,1510	0,9640
0/-1	51	-0,01068	0,00352	0,0829	0,0882	0,00102	-0,7096	-0,6892	0,0986
0/-1	52	0,00073	0,00319	0,0787	0,0874	0,00157	-0,1044	-0,2233	0,0303
0/-1	53	0,00296	0,00595	0,0557	0,0769	0,00384	-0,0271	-0,1888	-0,0515
0/-1	55	-0,00218	0,00000	0,0716	0,0891	0,00344	-0,2027	-0,2197	-0,1210
1/1	71	0,00851	0,00601	0,0921	0,1079	0,00295	1,2682	0,4499	0,1032
1/1	72	0,00768	0,00965	0,0908	0,1172	0,00457	0,4005	-0,0596	0,0446

Поскольку значения относительного изменения диаметра $\Delta d/d$ образцов меньше значения 2σ -интервала для окружной деформации (0,016), за исключением одного образца (№ 62), представленные значения изменения окружной $\Delta e'_d$ компоненты деформации ползучести, отнесенные к изменению свободного распухания ΔS_0 , не корректны и не используются при обработке экспериментальных данных, представленных в табл. 1.

3. Обработка экспериментальных данных по радиационному распуханию. Представим формулу (2) в виде

$$S = S_0 + S_\sigma, \quad (3)$$

где

$$S_\sigma = S_0 Pf(\sigma_m, \sigma_{eq}). \quad (4)$$

Уравнение (4) запишем следующим образом:

$$\frac{\Delta S_\sigma}{\Delta S_0} = Pf(\sigma_m, \sigma_{eq}). \quad (5)$$

Рассмотрим применимость второй гипотезы к описанию приведенных в табл. 1 экспериментальных данных. Для этого проверим, описываются ли экспериментальные данные уравнением (5) при допущении, что $f(\sigma_m, \sigma_{eq}) = \sigma_{eq}$. На рис. 1 представлены значения $\Delta S_\sigma / \Delta S_0$ как функция значений σ_{eq} . Коэффициент детерминации R^2 между экспериментальными точками и уравнением (5) мал и составляет 0,02, что свидетельствует об отсутствии связи между переменными. Следовательно, можно заключить, что вторая гипотеза о невлинии знака напряжений на распухание не описывает экспериментальные данные и может быть отклонена.

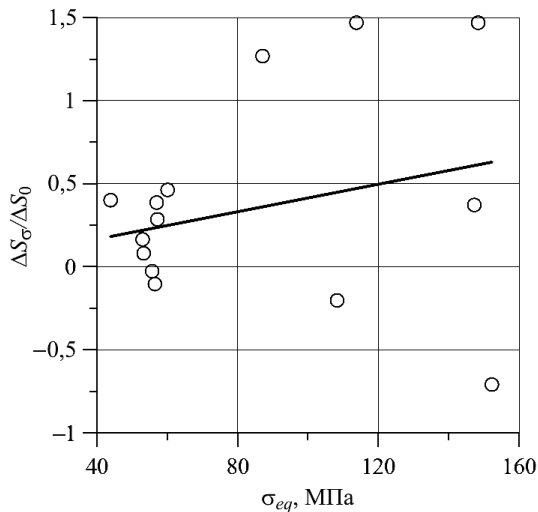


Рис. 1. Зависимость $\Delta S_\sigma / \Delta S_0$ от интенсивности напряжений σ_{eq} . (Точки – экспериментальные данные, использованные из табл. 1; сплошная линия – аппроксимация экспериментальных данных уравнением (5) при $f(\sigma_m, \sigma_{eq}) = \sigma_{eq}$.)

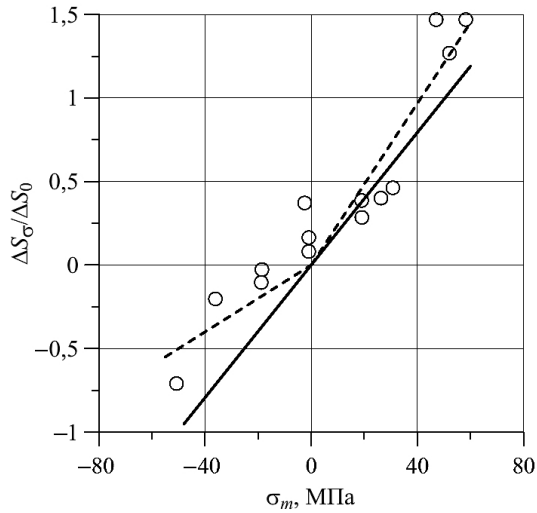


Рис. 2. Зависимость $\Delta S_\sigma / \Delta S_0$ от гидростатического напряжения σ_m . (Точки – экспериментальные данные, использованные из табл. 1; сплошная линия – аппроксимация экспериментальных данных уравнением (5) при $f(\sigma_m, \sigma_{eq}) = \sigma_m$; штриховая – то же при допущении, что при $\sigma_m > 0$ и $\sigma_m < 0$ значение коэффициента P различается.)

Теперь рассмотрим применимость первой гипотезы к описанию экспериментальных данных. Для этого в уравнении (5) примем, что $f(\sigma_m, \sigma_{eq}) = \sigma_m$. На рис. 2 представлены значения $\Delta S_\sigma / \Delta S_0$ как функция значений σ_m .

Коэффициент детерминации R^2 между экспериментальными точками и уравнением (5) при условии, что P не зависит от знака σ_m , составляет 0,76, при условии, что P зависит от знака σ_m – 0,84 для значений $\sigma_m > 0$ и 0,65 для $\sigma_m < 0$. Полученные результаты говорят о достаточно хорошем описании экспериментальных данных уравнением (5) при $f(\sigma_m, \sigma_{eq}) = \sigma_m$, в том числе, если P зависит от знака σ_m .

Из рис. 2 видно, что аппроксимирующие прямые при $\sigma_m > 0$ и $\sigma_m < 0$ имеют разный угол наклона к оси абсцисс: при растягивающем напряжении ($\sigma_m > 0$) абсолютная скорость распухания больше, чем при сжимающем ($\sigma_m < 0$), т.е. существует значимое влияние знака напряжений на темп распухания. Кроме того, при $\sigma_m \approx 0$ имеет место значительное распухание ΔS_σ вследствие действия касательных напряжений. На основании полученных данных безоговорочно принять первую гипотезу нельзя в связи со следующими обстоятельствами. Напряжения сильно влияют на рост пор в результате диффузии вакансий. Направление потока вакансий, обусловленного наличием напряжений, зависит от знака напряжений. При растягивающих напряжениях поток направлен к поре, при сжимающих – от поры [40–43]. При одном и том же уровне напряжений и различном их знаке (растяжение и сжатие) мощность потока вакансий будет одинакова, но иметь противоположное направление. Поэтому, если принять, что на распухание влияет только гидростатическая компонента напряжений, а распухание S_σ обусловлено только диффузией вакансий под действием растягивающих напряжений (притоком вакансий) или сжимающих (оттоком вакансий), зависимость $\Delta S_\sigma / \Delta S_0 = f(\sigma_m)$ должна быть нечетной функцией, т.е. $(\Delta S_\sigma / \Delta S_0)(\sigma_m) = |(\Delta S_\sigma / \Delta S_0)(-\sigma_m)|$.

Как видно из рис. 2, при $\sigma_m < 0$ влияние σ_m на $\Delta S_\sigma / \Delta S_0$ слабее, чем при $\sigma_m > 0$. Это может свидетельствовать о влиянии на распухание не только σ_m , но и σ_{eq} , что подтверждается наличием ненулевых значений $\Delta S_\sigma / \Delta S_0$ при $\sigma_m \approx 0$.

Предположим, что на распухание влияет некоторое эффективное напряжение $\sigma_{eff} = (1 - \eta)\sigma_m + \eta\sigma_{eq}$, где η – коэффициент, определяющий степень влияния σ_m и σ_{eq} на распухание (при $\eta = 0$ имеет место первая гипотеза о влиянии напряжений на распухание, при $\eta = 1$ – вторая гипотеза). При $\sigma_m > 0$ модуль эффективного напряжения $|\sigma_{eff}|$ будет больше, чем при $\sigma_m < 0$, при условии, что в обоих случаях величина $|\sigma_m|$ одна и та же. В этом случае возможна ситуация, когда зависимость $\Delta S_\sigma / \Delta S_0 = f(\sigma_{eff})$ будет единой как при $\sigma_m > 0$, так и при $\sigma_m < 0$.

Таким образом, полученную на рис. 2 “асимметричность” влияния σ_m можно “исправить”, если ввести понятие “эффективного напряжения” и $f(\sigma_m, \sigma_{eq})$ принять в виде $(1 - \eta)\sigma_m + \eta\sigma_{eq}$.

На рис. 3 представлены значения $\Delta S_\sigma / \Delta S_0$ как функция значений σ_{eff} , отвечающая зависимости (5) при $f(\sigma_m, \sigma_{eq}) = (1 - \eta)\sigma_m + \eta\sigma_{eq}$. Коэффициенты P и η в уравнении (5) определены методом наименьших квадратов: $P = 20,7 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}^{-1}$, $\eta = 0,15$.

Видно, что экспериментальные данные очень хорошо описываются зависимостью (5) при введении $f(\sigma_m, \sigma_{eq}) = \sigma_{eff}$ (рис. 3). Коэффициент детерминации R^2 между экспериментальными точками и уравнением (5) весьма высокий и составляет 0,93.

Таким образом, влияние напряжений на радиационное распухание может быть адекватно описано уравнением (5) при введении в качестве $f(\sigma_m, \sigma_{eq})$ эффективных напряжений $\sigma_{eff} = (1 - \eta)\sigma_m + \eta\sigma_{eq}$, где η – константа материала, в общем случае зависящая от величины распухания. Из рис. 3,б хорошо видно, что σ_{eff} и уравнение (5) позволяют описать влияние различных видов напряженного состояния (растяжение, сжатие, двухосное растяжение, кручение) на радиационное распухание.

Следует отметить, что значение коэффициента η можно определить только на основании экспериментальных данных о влиянии различных видов напряженного состояния на распухание. При известном значении η коэффициент P может быть определен из достаточно простых опытов: исследование распухания материала газонаполненных трубок.

Определим значение P на основании известных экспериментальных данных [12, 44–47]. В табл. 2 приведены значения коэффициента P_1 в формуле (1), полученные из эксперимента по распуханию материала газонаполненных трубок.

Связь между P и P_1 может быть получена при условии, что расчет по формулам (1) и (2) должен давать один и тот же результат при одних и тех же значениях осевой σ_z и окружной σ_θ компонент напряжений, действующих в газонаполненной трубке.

Тогда можно записать

$$P_1 \sigma_m = P((1 - \eta)\sigma_m + \eta\sigma_{eq}). \quad (6)$$

Т а б л и ц а 2

Коэффициенты P_1 и P в зависимостях радиационного распухания от напряжений (1) и (2) для разных марок аустенитных сталей в аустенизированном состоянии, облученных при различных температурах и повреждающих дозах

Марка стали	Температура облучения, °С	Повреждающая доза, сна	P_1 , 10^{-3} МПа $^{-1}$	P , 10^{-3} МПа $^{-1}$	Литературный источник
AISI 316	447...475	44,5	4	3,6	[12]
ЭИ847	480	60	2,8	2,5	[44]
	450	37	6,6	5,9	[45]
AISI 316	–	–	1,2...1,8	1,1...1,6	[46]
0X16H15M3Б	395...410	79	17,7	16,0	[47]
		88	7,0	6,3	
		94	5,3	4,6	
304L	438...557	25...39	–	20,7	[38]

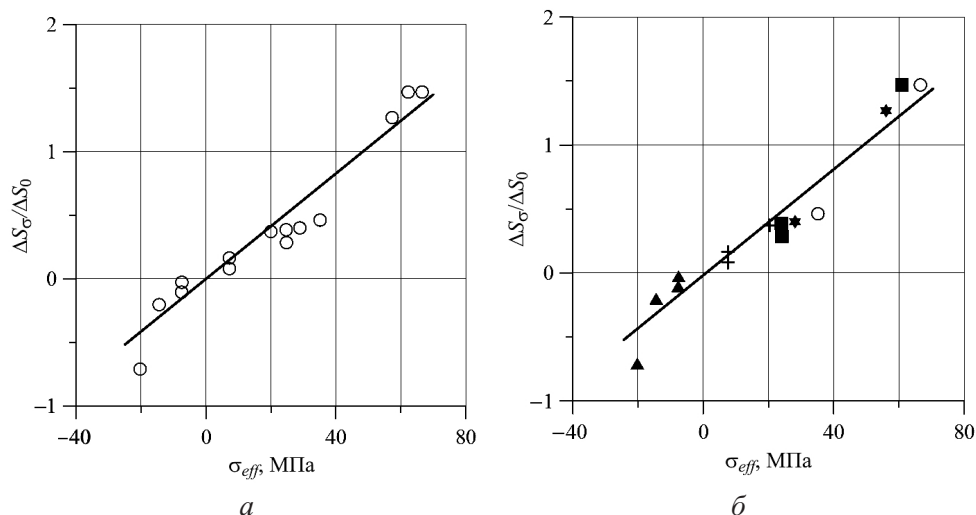


Рис. 3. Зависимость $\Delta S_\sigma/\Delta S_0$ от эффективного напряжения σ_{eff} при представлении экспериментальных данных из табл. 1 без обозначения напряженного состояния – а и с обозначением – б (▲ – 0/-1; ★ – 1/1; + – 1/-1; ■ – 0/1, 1/0; ○ – 2/1). (Сплошные линии – аппроксимация экспериментальных данных уравнением (5) при $f(\sigma_m, \sigma_{eq}) = \sigma_{eff}$.)

С учетом того, что в газонаполненных тонкостенных трубках радиальная компонента напряжений $\sigma_r \approx 0$, а окружная компонента $\sigma_\theta = 2\sigma_z$, получим $\sigma_m = \sigma_\theta/2$, $\sigma_{eq} = (\sqrt{3}/2)\sigma_\theta$. Подставляя эти значения в уравнение (6) и учитывая, что $\eta = 0,15$, имеем

$$P = 0,9P_1. \tag{7}$$

В табл. 2 представлены также значения P , рассчитанные по формуле (7) [12, 44–47] и полученные на базе экспериментальных данных [38]. Как видно,

величина $P = 20,7 \cdot 10^{-3}$ МПа⁻¹ существенно выше значений, рассчитанных по формуле (7). Учитывая, что завышенное значение P будет приводить к заниженному уровню напряжений, обусловленных градиентом распухания в элементе конструкции, для расчета рекомендуется использовать среднюю по данным табл. 2 величину $P = P_{cp}$, которая составляет $P_{cp} = 8 \cdot 10^{-3}$ МПа⁻¹.

4. Обработка экспериментальных данных по радиационной ползучести. В общем случае скорость радиационной ползучести может быть рассчитана по формуле [11, 48, 49]

$$\xi_{eq}^c = \left(B_0 \frac{dD}{dt} + \omega \dot{S}_w \right) \sigma_{eq}, \quad (8)$$

где $\xi_{eq}^c = d\varepsilon_{eq}^c/dt$; $d\varepsilon_{eq}^c$ – интенсивность приращения деформации ползучести; t – время; B_0 , ω – константы материала, слабо зависящие от температуры; dD/dt – скорость набора повреждающей дозы, сна/с; σ_{eq} – интенсивность напряжений, МПа; под \dot{S}_w будем понимать либо скорость полного распухания \dot{S} , либо скорость свободного распухания \dot{S}_0 , с⁻¹.

Целью настоящего раздела является выяснение, какой из параметров: \dot{S} или \dot{S}_0 наиболее адекватно описывает радиационную ползучесть, а также определение коэффициентов B_0 и ω на основании экспериментальных данных, представленных в разд. 2 и в некоторых литературных источниках.

Как было показано в разд. 2, измерения изменения диаметра трубок были выполнены с большими погрешностями. Для анализа радиационной ползучести можно использовать только имеющиеся в табл. 1 нормированные по ΔS_0 значения приращения осевой девиаторной компоненты деформации ползучести ($\Delta e'_L / \Delta S_0$). Учитывая это, а также то, что данные о сдвиговой компоненте деформации ползучести γ отсутствуют, оценка параметров в уравнении (8) может быть выполнена только на основании результатов, полученных для случаев осевого растяжения (0/1) и осевого сжатия (0/-1): $d\varepsilon_{eq}^c = = |de'_L|$, $\Delta\varepsilon_{eq}^c = |\Delta e'_L|$.

Представляя уравнение (8) в конечных разностях при $\sigma_{eq} = \text{const}$ и учитывая, что $\Delta\varepsilon_{eq}^c = |\Delta e'_L|$, получаем

$$\frac{|\Delta e'_L|}{\sigma_{eq} \Delta D} = B_0 + \omega \frac{\Delta S_w}{\Delta D}. \quad (9)$$

Согласно данным [34, 46] коэффициент B_0 для аустенитных сталей может быть принят равным $1 \cdot 10^{-6}$ (МПа · сна)⁻¹.

Экспериментальные данные ползучести, представленные в табл. 3, были аппроксимированы уравнением (9) при $\Delta S_w = \Delta S_0$ (рис. 4). Коэффициент детерминации R^2 между экспериментальными данными и зависимостью (9)

Т а б л и ц а 3

Данные для нахождения коэффициента ω в уравнении радиационной ползучести [38]

Тип напряженного состояния	№ образца	S_n	S_k	$\frac{\Delta S_\sigma}{\Delta S_0}$	ΔS_0	$\frac{\Delta \epsilon'_L}{\Delta S_0}$
0/1	42	0,0488	0,0716	0,3861	0,0164	0,1900
0/1	43	0,0272	0,0447	0,2852	0,0136	0,2600
0/-1	51	0,0829	0,0882	-0,7096	0,0183	-0,6892
0/-1	52	0,0787	0,0874	-0,1044	0,0097	-0,2233
0/-1	53	0,0557	0,0769	-0,0271	0,0218	-0,1888
0/-1	55	0,0716	0,0891	-0,2027	0,0219	-0,2197

Тип напряженного состояния	№ образца	$\Delta \epsilon'_L$	σ_{eq} , МПа	ΔD , сна	$\frac{ \Delta \epsilon'_L }{\sigma_{eq} \Delta D}$, $10^{-6} (\text{МПа} \cdot \text{сна})^{-1}$	$\frac{\Delta S_0}{\Delta D}$, сна^{-1}	$\frac{\Delta S}{\Delta D}$, сна^{-1}
0/1	42	0,0031	57,0	6,34	8,6	0,00259	0,00360
0/1	43	0,0035	57,2	6,34	9,8	0,00215	0,00276
0/-1	51	-0,0126	152,3	5,11	16,2	0,00357	0,00102
0/-1	52	-0,0022	56,5	5,53	6,9	0,00176	0,00157
0/-1	53	-0,0041	55,7	5,53	13,4	0,00394	0,00384
0/-1	55	-0,0048	108,3	5,11	8,7	0,00430	0,00344

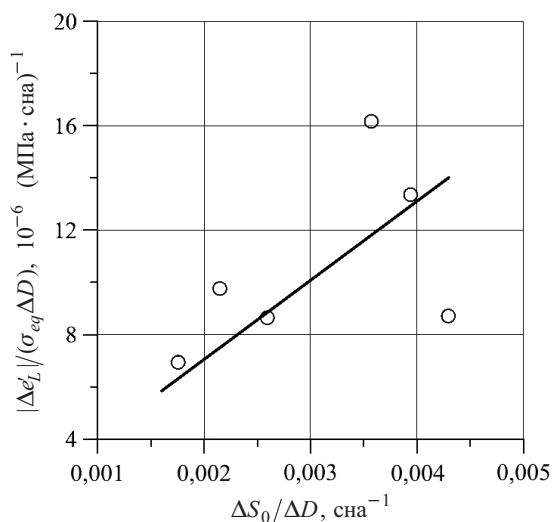


Рис. 4. Зависимость $|\Delta \epsilon'_L|/(\sigma_{eq} \Delta D)$ от $\Delta S_0/\Delta D$. (Точки – экспериментальные данные; сплошная линия – аппроксимация экспериментальных данных уравнением (9) при $\Delta S_w = \Delta S_0$.)

при $\Delta S_w = \Delta S_0$ равен 0,12. Следовательно, допущение $\Delta S_w = \Delta S_0$ в уравнении (9) не обеспечивает достаточно адекватного описания радиационной ползучести.

На рис. 5 представлены экспериментальные данные и их аппроксимация уравнением (9) при $\Delta S_w = \Delta S$. Как видно, все точки, кроме одной (темная точка для образца № 51), группируются около прямой. Кроме того, эта точка явно выпадает из множества остальных точек. При обработке экспериментальных данных она была исключена из рассмотрения. Коэффициент детерминации R^2 между экспериментальными данными и зависимостью (9) при $\Delta S_w = \Delta S$ равен 0,33, что свидетельствует об умеренной силе связи между экспериментальными данными и уравнением (9). Следовательно, использование в формуле (8) в качестве ΔS_w значения ΔS позволяет более адекватно описать радиационную ползучесть, чем использование ΔS_0 . Таким образом, можно заключить, что скорость ползучести зависит не только от σ_{eq} , но и от σ_m , так как ΔS зависит также от σ_m . Иными словами, девиаторные компоненты деформации ползучести зависят как от девиаторных компонент напряжений, так и от шаровой компоненты. Такой вывод не является общепринятым в классических теориях пластичности и ползучести, но соответствует теоретической модели [39] и экспериментальным результатам [38].

Обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов позволила определить параметр $\omega = 2,7 \cdot 10^{-3}$ МПа⁻¹.

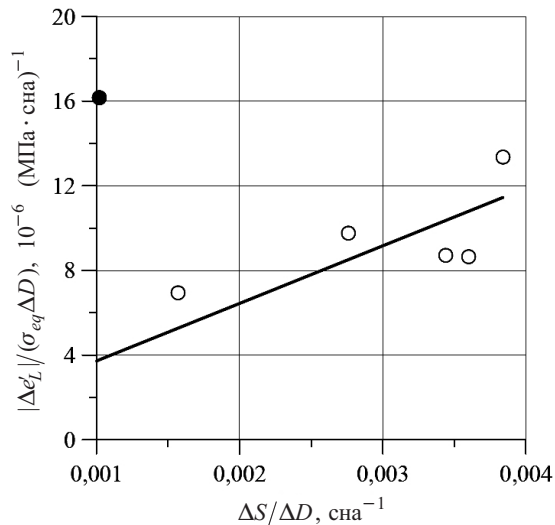


Рис. 5. Зависимость $|\Delta \epsilon_L| / (\sigma_{eq} \Delta D)$ от $\Delta S / \Delta D$. (Точки – экспериментальные данные; сплошная линия – аппроксимация экспериментальных данных уравнением (9) при $\Delta S_w = \Delta S$.)

Теперь определим параметр ω на основании экспериментальных данных, приведенных в некоторых литературных источниках.

В работе [34] для стали 08X18H10T использовался параметр $B_\Sigma = B_0 + \omega(dS_0/dD) = (1,0 \dots 7,0) \cdot 10^{-6}$ (МПа · снa)⁻¹ при температурах облучения $T_{обл} = 290 \dots 530^\circ\text{C}$ и повреждающих дозах D до 56 снa. Согласно этим данным целесообразно принять, что при $T_{обл} = 530^\circ\text{C}$ и $D = 56$ снa параметр $B_\Sigma = 7,0 \cdot 10^{-6}$ (МПа · снa)⁻¹. В соответствии с [34, 46] величина $B_0 = 1 \cdot 10^{-6}$ (МПа · снa)⁻¹.

Осредненная величина dS_0/dD в диапазоне $D = 0...56$ сна может быть рассчитана по формуле [34]

$$\frac{dS_0}{dD} \approx \frac{S_0}{D}. \quad (10)$$

Тогда получим

$$\omega = \frac{B_\Sigma - B_0}{\left(\frac{S_0}{D}\right)}, \quad (11)$$

где $B_\Sigma = 7,0 \cdot 10^{-6}$ (МПа · сна) $^{-1}$; $B_0 = 1 \cdot 10^{-6}$ (МПа · сна) $^{-1}$; S_0 – величина свободного распухания при $T_{\text{обл}} = 530^\circ\text{C}$ и $D = 56$ сна.

Согласно [34] свободное распухание S_0 для стали 08X18H10T может быть рассчитано по формуле

$$S_0 = c_D D^n \exp(-r(T_{\text{обл}} - T_{\text{max}})^2), \quad (12)$$

где T_{max} – температура максимального распухания, $T_{\text{max}} = 470^\circ\text{C}$; c_D , n и r – коэффициенты, $c_D = 1,035 \cdot 10^{-4}$ сна $^{-n}$, $n = 1,88$, $r = 1,825 \cdot 10^{-4}$ ($^\circ\text{C}$) $^{-2}$.

Подставив уравнение (12) в формулу (11), при $T_{\text{обл}} = 530^\circ\text{C}$ и $D = 56$ сна получим $\omega = 3,2 \cdot 10^{-3}$ МПа $^{-1}$.

Таким образом, выполненные оценки на основании различных экспериментальных данных и по разным процедурам дают близкие величины ω для сталей близких классов, например стали 304 (российский аналог – X18H9) и X18H10T (зарубежный аналог – сталь 321). Следовательно, оценка величины $\omega = (2,7...3,2) \cdot 10^{-3}$ МПа $^{-1}$ является достаточно надежной.

5. Обсуждение результатов. Анализ полученных данных показывает, что на распухание влияет как гидростатическая компонента напряжений σ_m , так и интенсивность напряжений σ_{eq} , т.е. параметр, контролирующий касательные напряжения. Приведем физическую интерпретацию влияния σ_m и σ_{eq} на радиационное распухание.

На рис. 6 представлена типичная зависимость среднего диаметра пор и их концентрации от величины распухания [47]. Видно, что при распухании, меньшем некоторой величины $S^* \approx 1$ ($S < S^* \approx 1$), концентрация пор резко увеличивается, в то время как их средний диаметр практически не изменяется. При $S > S^* \approx 1$ концентрация пор выходит на насыщение и даже начинает несколько падать, а средний диаметр интенсивно растет. Такой характер зависимости обусловлен следующими обстоятельствами. При $S < S^*$ распухание увеличивается в основном за счет процесса зарождения пор, приводящего к повышению их концентрации, при $S > S^*$ – за счет роста пор (увеличения их диаметра). Уменьшение концентрации пор при $S > S^*$ происходит вследствие их объединения. При этом процесс зарождения пор может продолжаться, однако уменьшение их концентрации в результате объединения выше, чем при зарождении новых.

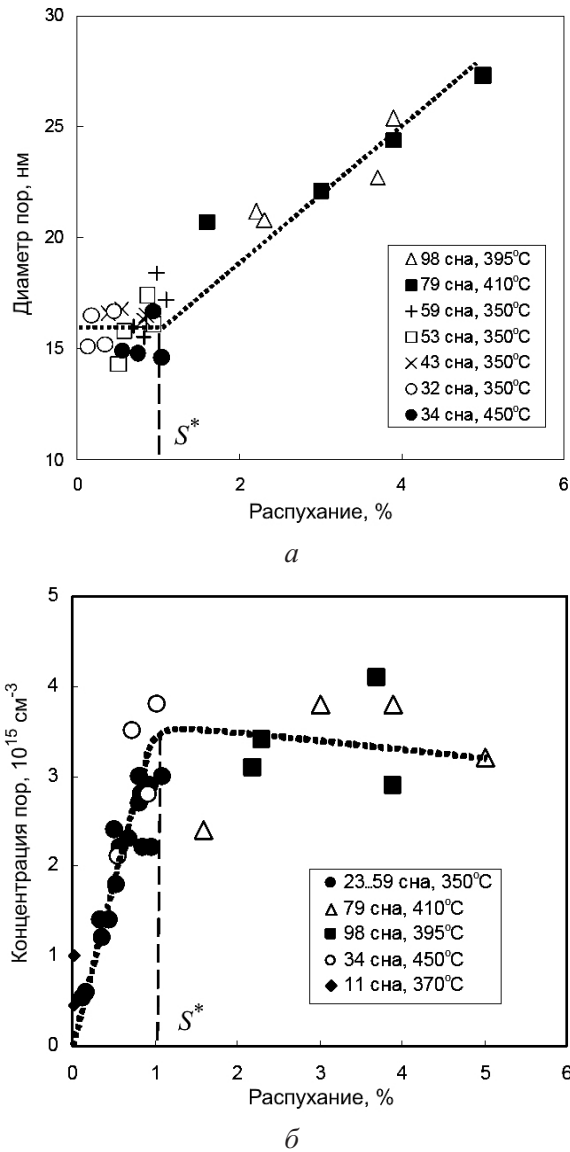


Рис. 6. Зависимость среднего диаметра пор (а) и их концентрации (б) от распухания аустенитной стали 0X16N15M3B, облученной в реакторе БОР-60 до различных повреждающих доз ($T_{\text{обл}} = 350...450^\circ\text{C}$) [47].

Действие касательных напряжений (в общем случае девиаторных компонент напряжений) приводит к активизации движения дислокаций и, следовательно, к формированию дислокационных скоплений. Если дислокационное скопление локализовано у частицы второй фазы с низкой прочностью связи с матрицей, то здесь может зародиться пора вследствие разрушения этой связи. Значит, действие девиаторных компонент напряжений приводит к увеличению концентрации пор.

Рассмотрим другой механизм влияния девиаторных компонент напряжений на усиление распухания [50]. Дислокационное скопление можно предста-

вить как дислокацию мощностью Nb , где N – количество дислокаций в скоплении; b – вектор Бюргерса. Такая дислокация имеет радиус захвата межузельного атома в N раз больше, чем отдельная дислокация [51]. В этом случае объем захвата для супердислокации единичной длины составляет $\sim \pi(Nb)^2$, а объем захвата для N отдельных дислокаций – $N\pi b^2$. Видно, что объем захвата дислокационного скопления в N раз больше, чем для N отдельных дислокаций. Следовательно, дислокационные структуры типа скоплений будут обеспечивать большее поглощение межузельных атомов, чем отдельные дислокации. В результате повысится концентрация вакансий и, следовательно, увеличится скорость зарождения пор вследствие взаимодействия кластеров вакансий с газовыми атомами [22, 52, 53]. Ясно, что увеличение концентрации вакансий приведет также к ускорению роста пор за счет диффузионных процессов.

Таким образом, девиаторные компоненты напряжений ускоряют зарождение и рост пор. Гидростатическая компонента напряжений σ_m , как указывалось выше, ускоряет (при $\sigma_m > 0$) или замедляет (при $\sigma_m < 0$) рост пор.

Проведенный анализ показывает, что при $S < S^* \approx 1\%$ доминирующее влияние на распухание оказывает процесс зарождения пор и, следовательно, интенсивность напряжений σ_{eq} , при $S > S^* \approx 1\%$ – увеличение пор, хотя их зарождение продолжает влиять на рост распухания; концентрация пор уменьшается за счет их объединения. Таким образом, при $S > S^* \approx 1\%$ на распухание влияет как σ_m , так и σ_{eq} . Исходя из указанных закономерностей при $S < S^*$ коэффициент η , по-видимому, близок к единице, при $S > S^*$ он значительно уменьшается, так как основное влияние оказывает σ_m .

Отметим, что определенный коэффициент η соответствует влиянию напряжений на распухание при $S > S^*$.

Выводы

1. Получена зависимость, описывающая влияние различного вида напряженного состояния на радиационное распухание. Показано, что влияние напряжений может быть сведено к одному параметру – σ_{eff} .

2. Анализ механизмов зарождения и роста вакансионных пор свидетельствует, что при $S \approx 1\%$ основное влияние на распухание оказывают девиаторные компоненты напряжений, т.е. σ_{eq} . В этом случае $\eta \rightarrow 1$. При $S > \approx 1\%$ на распухание влияют как девиаторная, так и шаровая компоненты напряжений. В результате выполненных оценок получено $\eta = 0,15$.

3. Установлено, что радиационная ползучесть лучше описывается при включении в уравнение ползучести скорости полного распухания, чем скорости свободного распухания.

4. Обобщение имеющихся данных дает возможность оценить значение коэффициента P в уравнении (2) для аустенитных сталей при $T_{обл} \leq 550^\circ\text{C}$: $P = 8 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}^{-1}$.

5. Для стали типа X18H10T определено значение коэффициента ω в уравнении (8): $\omega = (2,7 \dots 3,2) \cdot 10^{-3} \text{ МПа}^{-1}$.

Часть исследований, представленных в настоящей работе, выполнена в рамках проекта МНТЦ 3973.

Резюме

Представлено результати аналізу експериментальних даних щодо впливу виду напруженого стану на радіаційне розпухання аустенітних сталей. Сформульовано визначальне рівняння, що дозволяє описувати вплив об'ємного напруженого стану на розпухання аустенітних сталей з урахуванням різних внесків кульової і девіаторної компонент напружень. Запропоновано фізичну інтерпретацію отриманої залежності радіаційного розпухання від напруженого стану. Уточнено залежність радіаційної повзучості від розпухання з урахуванням напруженого стану. Визначено значення коефіцієнтів, які входять у сформульоване визначальне рівняння і у залежність радіаційної повзучості.

1. Шарый Н. В., Семишкин В. П., Пиминов В. А., Драгунов Ю. Г. Прочность основного оборудования и трубопроводов реакторных установок ВВЭР. – М.: Изд-во АТ, 2004. – 496 с.
2. Усынин Г. Б., Кусмарцев Е. В. Реакторы на быстрых нейтронах: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 288 с.
3. Марголин Б. З., Курсевич И. П., Сорокин А. А. и др. К вопросу о радиационном распухании и радиационном охрупчивании аустенитных сталей. Ч. I. Экспериментальные результаты // Вопр. материаловедения. – 2009. – № 2 (58). – С. 89 – 98.
4. Марголин Б. З., Курсевич И. П., Сорокин А. А. и др. К вопросу о радиационном распухании и радиационном охрупчивании аустенитных сталей. Ч. II. Физические и механические закономерности охрупчивания // Там же. – С. 99 – 111.
5. Марголин Б. З., Курсевич И. П., Сорокин А. А. и др. Охрупчивание и трещиностойкость высокооблученных аустенитных сталей для элементов ВКУ ВВЭР. Сообщ. 1. Связь радиационного распухания с радиационным охрупчиванием – экспериментальные результаты // Пробл. прочности. – 2009. – № 6. – С. 5 – 16.
6. Марголин Б. З., Курсевич И. П., Сорокин А. А. и др. Охрупчивание и трещиностойкость высокооблученных аустенитных сталей для элементов ВКУ ВВЭР. Сообщ. 2. Связь радиационного распухания с радиационным охрупчиванием – физические и механические закономерности // Там же. – 2010. – № 2. – С. 25 – 38.
7. Neustroev V. S. and Garner F. A. Very high swelling and embrittlement observed in a Fe-18Cr-10Ni-Ti hexagonal fuel wrapper irradiated in the BOR-60 fast reactor // Fusion Mater. – 2007. – 43. – P. 109 – 122.
8. Dubuisson P. H., Seran J. L., and Soulat P. Irradiation embrittlement of reactors internals materials // Effect of Irradiation on Water Reactors Internals (June 1997, Paris), AMES Report No. 11, 1997. – Vol. 3. – P. 30 – 34.

9. Bullough R., Finnis M. H., and Wood M. Y. A theory of irradiation creep and thermal creep by dislocation climb // *J. Nucl. Mater.* – 1981. – **103-104**, No. 1-3. – P. 1263 – 1268.
10. Bates J. F. and Gilbert E. R. Experimental evidence for stress enhanced swelling // *Ibid.* – 1976. – **59**, No. 2. – P. 95 – 102.
11. Flinn J. E., McVay G. L., and Walters L. C. In-reactor deformation of solution annealed type 304L stainless steel // *Ibid.* – 1977. – **65**, No. 3. – P. 210 – 223.
12. Bates J. F. and Gilbert E. R. Effects of stress on swelling in 316 stainless steel // *Ibid.* – 1978. – **71**. – P. 286 – 292.
13. Garner F. A., Gilbert E. R., and Porter D. L. Stress-enhanced swelling of metals during irradiation // *ASTM STP 725*. – 1981. – P. 680 – 697.
14. Garner F. A. Irradiation performance of cladding and structural steels in liquid metal reactors // *Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment*. – VCH Publishers, 1994. – Vol. 10A. – P. 419 – 543.
15. Неустроев В. С., Островский З. Е., Шамардин В. К. Влияние напряжений на радиационное распухание и параметры вакансионной пористости облученных нейтронами аустенитных сталей // *Физика металлов и металловедение*. – 1998. – **86**, вып. 1. – С. 115 – 125.
16. Ehrlich K. Irradiation creep and interrelation with swelling in austenitic stainless steels // *J. Nucl. Mater.* – 1981. – **100**, No. 1-3. – P. 149 – 166.
17. Porter D. L., Takata M. L., and Wood E. L. Direct evidence for stress-enhanced swelling in type 316 stainless steel // *Ibid.* – 1983. – **116**, No. 2-3. – P. 272 – 276.
18. Hübner R. and Ehrlich K. Swelling and in-pile creep of neutron irradiated 15Cr15NiTi austenitic steels in the temperature range of 400 to 600°C // *Proc. Technical Committee Meeting “Influence of High Dose Irradiation on Core Structural and Fuel Materials in Advanced Reactors”* (June 16–19, 1997, Obninsk). – IAEA-TECDOC-1039, 1998. – P. 223 – 230.
19. Gawthorne C. and Fulton E. J. Voids in irradiated stainless steel // *Nature*. – 1967. – **216**, No. 5. – P. 575 – 576.
20. Harkness S. D. and Che Yu-Li. A model for void formation in metals irradiated in fast neutron environment // *Proc. IAEA Symp. “Radiation Damage in Reactor Materials”* (June 2–6, 1969, Vienna). – IAEA, 1969. – Vol. 2. – P. 189 – 214.
21. Brailsford A. D. and Bullough R. The rate theory of swelling due to void growth in irradiated metals // *J. Nucl. Mater.* – 1972. – **44**, No. 2. – P. 121 – 135.
22. Конобеёв Ю. В., Субботин А. В., и Голубов С. И. The theory of void and interstitial dislocation loop growth in irradiated metals // *Rad. Effects*. – 1973. – **20**, Issue 4. – P. 265 – 271.
23. Конобеёв Ю. В., Печенкин В. А. О механизме зарождения вакансионных пор в металлах и под облучением // *Вопр. атом. науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение*. – 1978. – Вып. 1. – С. 3 – 7.

24. *Claudson T. T., Barker R. W., and Fish R. L.* The effects of fast flux irradiation on the mechanical properties and dimensional stability of stainless steel // *Nucl. Appl. Technol.* – 1970. – **9**. – P. 10 – 23.
25. *Foster J. P. and Strain R. V.* Empirical swelling equations for solution annealed type 304 stainless steel // *Nucl. Technol.* – 1974. – **24**. – P. 93 – 98.
26. *Bates J. F. and Straalsund J. L.* Empirical representation of radiation-induced swelling of solution treated type 304 stainless steel // *Ibid.* – 1972. – **14**. – P. 292 – 298.
27. *Fish R. L., Straalsund J. L., Hunter C. W., and Holmes J. J.* Swelling and tensile properties evolution of high-fluence EBR-II thimbles // *ASTM STP 529*. – 1973. – P. 149 – 164.
28. *Weiner R. A. and Boltax A.* Comparison of high-fluence swelling behavior of austenitic stainless steels // *ASTM STP 725*. – 1981. – P. 484 – 499.
29. *Конобеев Ю. В., Печенкин В. А.* Состояние теории радиационной пористости в металлах // *Радиационные дефекты в металлических кристаллах*. – Алма-Ата: Наука, 1978. – С. 187 – 210.
30. *Karaulov V. N., Blynski A. P., Yakovlev I. L., and Kononova E. V.* Assemblies and fuel pin behavior under irradiation in FBR-350 // *Proc. Technical Committee Meeting “Influence of High Dose Irradiation on Core Structural and Fuel Materials in Advanced Reactors”* (June 16–19, 1997, Obninsk). – IAEA-TECDOC-1039, 1998. – P. 93 – 105.
31. *Неустроев В. С., Островский З. Е., Шамардин В. К., Яковлев В. В.* Экспериментальное исследование разрушения облученных шестигранных чехлов ТВС реактора БОР-60 // *Сб. докл. V Межотраслевой конференции по реакторному материаловедению (8–12 сент. 1997, Димитровград)*. – Димитровград, 1998. – Т. 2, ч. 2. – С. 42 – 66.
32. *Bloom E. E., Stiegler J. O., and McHargue C. J.* Radiation damage in annealed type 304 stainless steel // *Rad. Effects*. – 1972. – **14**, No. 3-4. – P. 231 – 243.
33. *Быков В. Н., Конобеев Ю. В.* Радиационные повреждения конструкционных материалов быстрых реакторов // *Атомная энергия*. – 1977. – **43**, вып. 1. – С. 20 – 27.
34. *Васина Н. К., Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Курсевич И. П.* Радиационное набухание нержавеющей стали: влияние различных факторов. Обработка экспериментальных данных и формулировка определяющих уравнений // *Вопр. материаловедения*. – 2006. – № 4 (48). – С. 69 – 89.
35. *Porter D. L. and Garner F. A.* Swelling of AISI type 304L stainless steel in response to simultaneous variation in stress and displacement rate // *Proc. 12th Int. Symp. “Effects of Radiation on Materials”*. – ASTM 870. – 1985. – P. 212 – 220.
36. *Sahu H. K. and Yung P.* Void swelling and irradiation creep in stainless steel under compressive and tensile stress // *J. Nucl. Mater.* – 1985. – **136**, No. 2-3. – P. 154 – 158.
37. *Lauritzen T., Vaidyanathan S., Bell W. L., and Yang W. J. S.* Irradiation-induced swelling in AISI 316 steel: Effect of tensile and compressive stresses //

- Proc. 13th Int. Symp. "Radiation-Induced Changes in Microstructure". – ASTM STP 955. – 1987. – P. 101 – 113.
38. *Hall M. M., Jr., and Flinn J. E.* Stress state dependence of in-reactor creep and swelling. Pt. II: Experimental results // *J. Nucl. Mater.* – 2010. – **396**. – P. 119 – 129.
39. *Hall M. M., Jr.* Stress state dependence of in-reactor creep and swelling. Pt. I: Continuum plasticity model // *Ibid.* – 2010. – **396**. – P. 112 – 118.
40. *Hull D. and Rimmer D. E.* The growth of grain-boundary voids under stress // *Phil. Mag.* – 1959. – **4**. – P. 673 – 680.
41. *Speight M. V. and Beere W.* Vacancy potential and void growth on grain boundaries // *Metal. Sci.* – 1975. – **9**. – P. 180 – 191.
42. *Chen I. W. and Argon A. S.* Diffusive growth of grain-boundary cavities // *Acta Met.* – 1981. – **29**. – P. 1759 – 1768.
43. *Needleman A. and Rice J. R.* Plastic creep flow effect in diffusive cavitation of grain boundaries // *Ibid.* – 1980. – **28**. – P. 1315 – 1332.
44. *Vorobjev A. N., Budylkin N. I., et al.* Irradiation creep and stress-enhanced swelling of Fe–16Cr–15Ni–Nb austenitic stainless steel in BN-350 // *J. Nucl. Mater.* – 1998. – **258-263**. – P. 1618 – 1622.
45. *Shamardin V. K., Neustroev V. S., Golovanov V. N., et al.* Irradiation creep and swelling of 0Kh16N15M3B and its modification 0Kh16N15M3BR steel // Proc. 14 Int. Symp. "Effects of Radiation on Materials". – ASTM STP 1046. – 1990. – P. 753 – 765.
46. *Забудько Л. М., Лихачев Ю. И., Прошкин А. А.* Работоспособность ТВС быстрых реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 170 с.
47. *Neustroev V. S., Ostrovsky Z. E., and Shamardin V. K.* Experimental investigation of stress effect on swelling and microstructure of Fe–16Cr–15Ni–3Mo–Nb austenitic stainless steel under low-temperature irradiation up to high damage dose in the BOR-60 reactor // *J. Nucl. Mater.* – 2004. – **329-333**. – P. 119 – 129.
48. *Heald P. T. and Speight M. V.* Steady-state irradiation creep // *Phil. Mag.* – 1974. – **29**, No. 5. – P. 1075 – 1080.
49. *Gittus J. H.* Theory of dislocation-creep due to the Frenkel defects or interstitialcies produced by the bombardment with energetic particles creep // *Ibid.* – 1972. – **25**. – P. 345 – 354.
50. *Wolfer W. G., Ashkin M., and Boltax A.* Creep and swelling deformation in structural materials during fast-neutron irradiation // ASTM STP 570: "Properties of Reactor Structural Alloys after Neutron or Particle Irradiation". – 1975. – P. 233 – 258.
51. *Хирт Дж., Лоте И.* Теория дислокаций. – М.: Атомиздат, 1972. – 598 с.
52. *Russell K. C.* Nucleation of voids in irradiated materials // *Acta Met.* – 1971. – **19**, No. 8. – P. 753 – 758.
53. *Wiedersich H.* On the theory of void formation during irradiation // *Rad. Effects.* – 1972. – **12**. – P. 111.

Поступила 27. 09. 2011