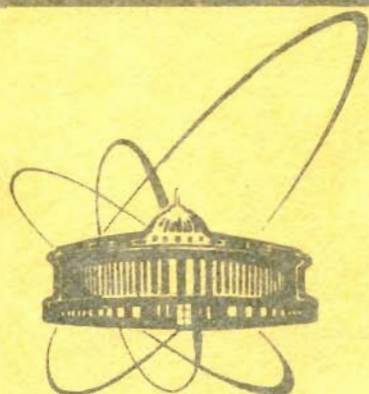


12741



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛ

18 - 12741

В.Р.Регель, В.А.Альперт, Д.Сенеш, Ю.А.Фадин

ВЛИЯНИЕ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ
НА ПРОЦЕССЫ ПОЛЗУЧЕСТИ
И РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЯ

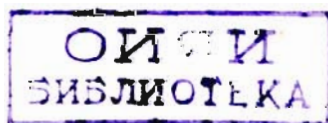
1979

18 - 12741

В.Р.Регель, В.А.Альперт, Д.Сенеш, Ю.А.Фадин

**ВЛИЯНИЕ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ
НА ПРОЦЕССЫ ПОЛЗУЧЕСТИ
И РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЯ**

Направлено в ЖТФ и Оргкомитет 2-ой Всесоюзной школы
по физике радиационных повреждений твердого
тела, Алушта, 1979.



Регель В.Р. и др.

18 - 12741

Влияние ионного облучения на процессы ползучести и разрушения алюминия

Исследованы скорость ползучести и долговечность алюминия под действием облучения ионами углерода с энергией 80 МэВ. Обнаружено значительное ускорение под облучением процессов ползучести и разрушения металла. Показано, что радиационная долговечность описывается формулой вида $\tau_j = A_j \exp(-\alpha_j \sigma)$. Получена первая информация о свойствах коэффициентов в этой формуле.

Полученные данные обсуждаются с позиций кинетических представлений о деформации и разрушении твердых тел.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований, Дубна 1979

Regel V.P. et al.

18 - 12741

Influence of Ion Irradiation on Creep and Fracture of Aluminium

The creep rate and time of fracture of aluminium samples were measured during irradiation by 80 MeV carbon ions. A significant increase of rates of creep and fracture was observed. It is shown that in a certain stress interval $\tau_j = A_j \exp(-\alpha_j \sigma)$, where τ - stress, A and α_j - empirical coefficients, the values of A_j and α_j have been estimated. The results are discussed from the point of view of kinetic theory of deformation and fracture of solids.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

Данные последней конференции по радиационному материаловедению^{/1/} и опубликованные к настоящему времени работы по изучению воздействия потоков различных энергичных частиц на механические свойства материалов^{/2-6,15/} говорят о постоянно растущем интересе к вопросам влияния излучений на протекающие в твердом теле процессы деформирования и разрушения. Эксперименты в этом направлении могут дать не только важные инженерно-практические сведения, в частности, для реакторостроения и термоядерного материаловедения, но и информацию для теории твердого тела, например, для развития представлений о радиационной ползучести и кинетической концепции прочности и долговечности материалов^{/6,7/}. Имеющиеся в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ ускорители тяжелых ионов представляют уникальную возможность для проведения радиационно-материаловедческих экспериментов, во-первых, потому, что энергичные тяжелые ионы обладают несравненно более высокой, чем все другие частицы, скоростью дефектообразования^{/8/}, и, во-вторых, потому, что они дают возможность сравнительно просто производить необходимые измерения непосредственно под облучением /для этого необходимо только, чтобы энергия ионов не превышала энергию кулоновского барьера для реакции частица - мишень/.

В настоящей работе исследованы первые общие закономерности, которыми описывается временная зависимость прочности и ползучесть тонких образцов алюминия, облучаемых потоком ионов углерода.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводились на циклотроне У-300 ЛЯР ОИЯИ. Ионы углерода выводились из ионопровода на воздух через алюминиевую фольгу толщиной 20 мкм и имели энергию после прохождения фольги около 80 МэВ. После коллимации /рис.1/ пучок проходил сквозь образец и регистрировался коллектором. Образец закреплялся в зажимах описанного в^{/6/} рычажного устройства,

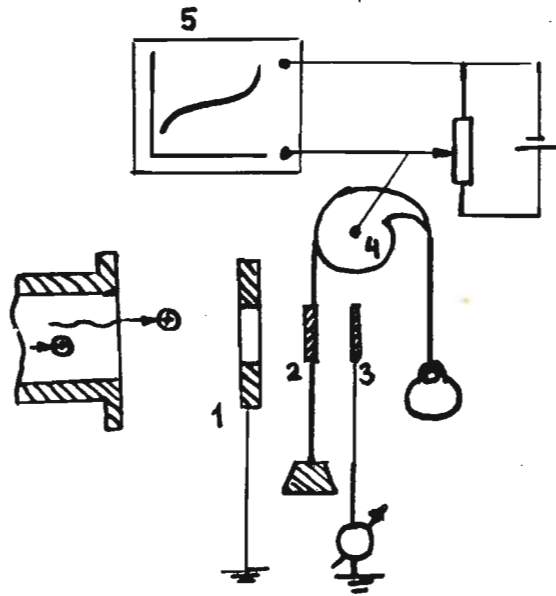


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 - диафрагма; 2 - образец; 3 - коллектор; 4 - рычажное устройство; 5 - самописец.

обеспечивающего постоянное растягивающее напряжение в образце в течение опыта. Ось рычага устройства была связана с осью потенциометра, что позволяло электрически с помощью самописца регистрировать кривую ползучести образца. Температура образца в процессе облучения контролировалась термопарой, находящейся в контакте с тыльной стороной образца. Погрешность в определении температуры составляла $\pm 10\%$. Опыт показал, что при интенсивности облучения 3×10^{11} ион/с температура образца достигает равновесного значения за 1 мин. и составляет 100°C . При малых временах облучения /менее 1 мин/ температура образца не успевает достигнуть равновесного значения.

Образцы были изготовлены из алюминиевой фольги /99,99%/ толщиной 20-40 мкм, прокатанной из пластины толщиной 0,5 мм, и имели форму двойных лопаток с длиной рабочей части 22 мм и шириной 4 мм. Исследовались два типа образцов: неотожженные /упрочненные прокаткой/ и отожженные на воздухе / 400°C , 1 ч/ с последующим медленным охлаждением. Погрешность регистрации относительной деформации образцов составляла 0,01%.

Исследования включали в себя измерения долговечности, относительной деформации на установившейся стадии ползучести и скорости ползучести в экспериментах без облучения ($\tau_j, \Delta \epsilon_j, \dot{\epsilon}_j$) и под облучением ($\tau_j, \Delta \epsilon_j, \dot{\epsilon}_j$). В экспериментах под облучением значения $\Delta \epsilon_j$ и $\dot{\epsilon}_j$ определялись следующим образом. Образец нагружался без облучения и в нагруженном состоянии подвергался облучению. Первые же опыты показали, что облучение резко ускоряет процесс ползучести, так что кривая радиационной ползучести имеет значительно больший наклон, чем без облучения. Если облучение прекратить, то скорость ползучести вновь уменьшается до исходной величины. Схематически этот эффект изображен на рис. 2а. Если образец выдерживается под облучением вплоть до разрушения, то кривая ползучести имеет вид, изображенный на рис. 2б. На этом рисунке обозначены измеряемые в экспериментах величины: $\tau_j, \Delta \epsilon_j, \dot{\epsilon}_j$.

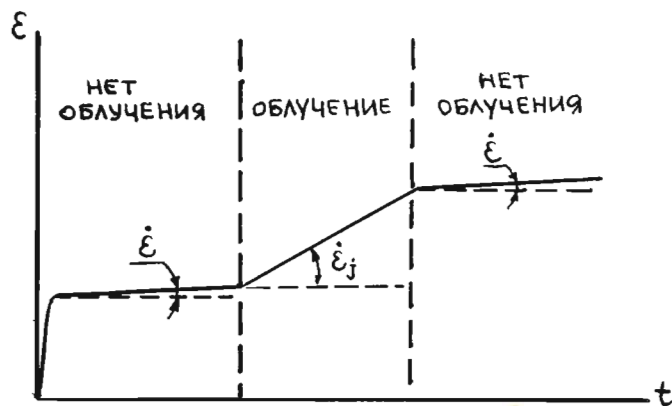
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты измерений долговечности и скорости ползучести образцов алюминия в условиях облучения сведены в табл. 1 и 2. Зависимости логарифма радиационной долговечности от напряжения $\ln \tau(\sigma)$ для неотожженных и отожженных образцов приведены соответственно на рис. 3 и 4. Для неотожженных образцов измерения проведены при трех различных значениях интенсивности тока $j = 1,5 \cdot 10^{11}; 3 \cdot 10^{11}, 6 \cdot 10^{11}$ ион/с. Для отожженных образцов измерения проведены при интенсивностях $j = 1 \cdot 10^{11}$ и 3×10^{11} ион/с. На рис. 3 и 4 для сопоставления приведены также зависимости $\ln \tau(\sigma)$, полученные при испытаниях без облучения.

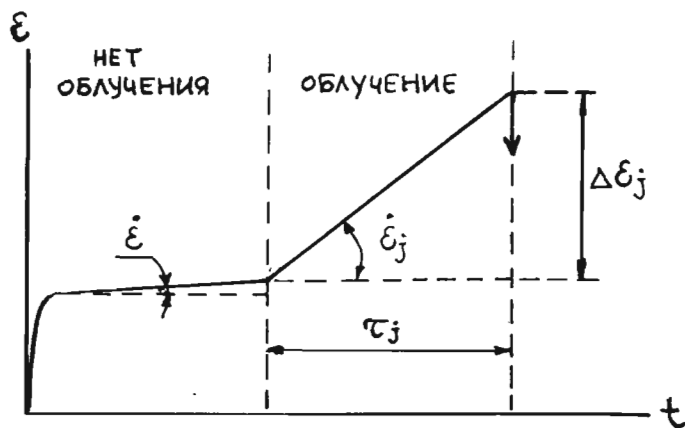
Видно, что при облучении зависимость $\ln \tau_j(\sigma)$ в некотором интервале напряжений линейна, как и для испытаний без облучения. Однако радиационная долговечность τ_j в области малых напряжений оказывается значительно ниже, чем долговечность без облучения. Для линейных участков зависимости $\ln \tau_j(\sigma)$ выполняется выражение вида:

$$\tau_j = A_j \times \exp(-a_j \sigma) \quad \text{при} \quad \sigma < \sigma_{1p}$$

/1а/



а/



б/

Рис. 2. Изменение скорости ползучести под действием облучения /схема/: а/ обратимое изменение скорости ползучести при действии и прекращении облучения; б/ вид кривой ползучести при разрушении образца под действием облучения.

Таблица 1
Результаты испытаний радиационной долговечности и ползучести прокатанного алюминия

№ пп	Толщина образца в мкм	σ кг/мм ²	j мкА	τ_j с	$\Delta \epsilon_j \times 10^4$	$\dot{\epsilon}_j \times 10^5$
1.	25	12	0,16	7	2,2	3
2.	20	11	0,2	11		2
3.	23	8	0,25	28		0,8
4.	22	10	0,3	20	2,5	1,2
5.	21	8	0,3	20	2,7	0,5
6.	20	7	0,3	65	3,9	0,6
7.	17	7	0,3	110	4	0,4
8.	25	6	0,3	240	4,1	0,2
9.	19	9	0,6	2		
10.	20	7	0,6	25		
11.	23	7	0,6	10		
12.	22	6	0,6	500		
13.	25	3	0,6	25200	4	2×10^{-3}
14.	21	12	0,15	1500	2,5	2×10^{-2}
15.	17	10	0,15	60	3	0,5
16.	25	8	0,15	40	1,8	0,5

При напряжениях, больших $\sigma_{гр}$, по-видимому, долговечность при облучении и без него становится одинаковой, подобно тому, как это имеет место в опытах по изучению влияния УФ-облучения на долговечность полимеров /см. глава 6 в ^{16/ /:}

$$\tau_j = \tau = A \times \exp(-\alpha \times \sigma) \text{ при } \sigma > \sigma_{гр} \quad /16/$$

Опыты, результаты которых представлены на рис. 3 и 4, позволяют судить о том, как зависят коэффициенты A_j и a_j от интенсивности облучения и от исходной структуры исследуемого материала.

Из рис. 3 и 4 следует, что изменение интенсивности облучения меняет в выражении /1а/ только значение предэкспоненты A_j , поскольку при изменении j прямые $\ln \tau_j(\sigma)$ смещаются почти параллельно друг другу, практически не меняя своего наклона.

Таблица 2

Результаты испытаний радиационной долговечности и ползучести отожженного алюминия

№№ пп	Толщина образца в мкм	σ кг/мм ²	j мкм	τ_j с	Δp мм	$\dot{\epsilon}_j \times 10^{-2}$
I.	23	5	0,3	5		I
2.	22	4	0,3	20		0,25
3.	3I	6	0,23	I		5
4.	27	5	0,22	3		I,7
5.	4I	4	0,2I	IO		0,5
6.	36	3	0,25	I8	0,7	0,3
7.	46	3	0,2I	9		0,5
8.	29	2	0,25	3660	0,5	IO^{-3}
9.	4I	2,5	0,25	50	0,5	0,1
IO.	29	2,3	0,25	250	I,0	$2 \times IO^{-2}$
II.	33	3,5	0,25	4		I,2
I2.	27	I,8	0,23	IO^4		IO^{-4}
I3.	33	5	0,1	7		0,5
I4.	45	4,5	0,1	100	I,25	$5 \times IO^{-2}$
I5.	28	3,8	0,1	4000	I	IO^{-3}
I6.	34	4,9	0,1	780	0,75	$6 \times IO^{-3}$
I7.	40	6	0,1	5		I

Рис. 3 показывает, что в первом приближении коэффициент A_j тем меньше, чем больше интенсивность облучения j . Для выявления количественной зависимости A_j от j необходимо внести поправки в опытные данные, приведенные на рис. 3, с учетом того, что разным значениям плотности ионного тока, падающего на образец, соответствует разная температура образца. При учете этой поправки, которую корректно пока внести трудно, разница в долговечности между кривыми 1, 2 и 3 должна уменьшиться. В результате не исключено, что долговечность τ_j при одном и том же напряжении σ окажется обратно-пропорциональной интенсивности облучения, по крайней мере, в некотором интервале значений j . В этом случае средняя скорость разрушения образца /обратная величина τ_j / оказалась бы просто пропорциональной числу ионов, падающих на образец в единицу времени, т.е. величине j . Однако данные измерений на отож-

женных образцах /рис. 4/ не подтверждают такой простой закономерности и свидетельствуют скорее о более сильной зависимости скорости разрушения /и ползучести/ от интенсивности облучения j , что особенно явно проявилось для отожженных образцов при интенсивностях ионного тока $j < 3 \times 10^{11}$ ион/с. Опыты на отожженных образцах показали, что эффект облучения при малых плотностях тока не пропорционален флюенсу, т.е. количеству ионов, прошедших через образец за время его жизни под облучением, а зависит от плотности ионного потока j , при которой набирается этот флюенс. Таким образом, судя по экспериментам с отожженными образцами, зависимость скорости разрушения от интенсивности облучения сильнее линейной, т.е. в формуле $A_j 1/j^n$, n больше единицы, по крайней мере, для отожженных образцов в области $j < 3 \times 10^{11}$ ион/с.

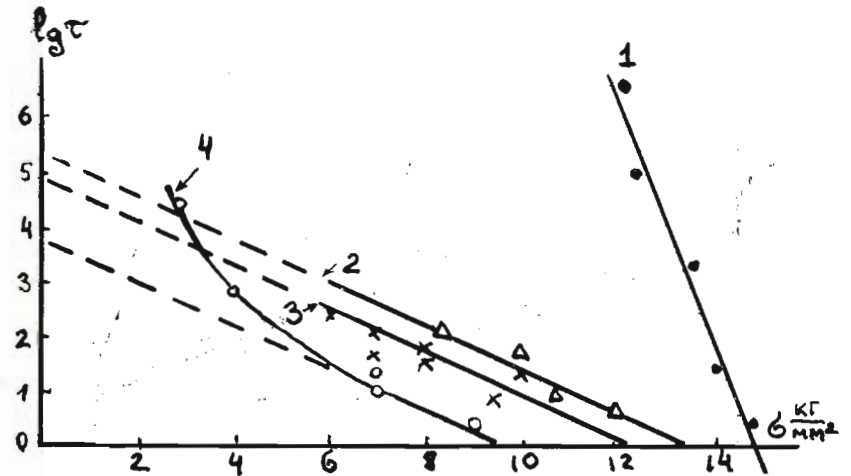


Рис. 3. Зависимость долговечности от напряжения при постоянной температуре для прокатанного алюминия. 1 - без облучения; 2 - $j = 1,5 \times 10^{11}$ ион/с; 3 - $j = 3 \times 10^{11}$ ион/с; 4 - $j = 6 \times 10^{11}$ ион/с.

Обратимся теперь к вопросу о зависимости коэффициентов A_j и $\dot{\epsilon}_j$ в формуле /1а/ от исходной структуры материала или в терминах кинетической концепции прочности, от величины структурно-чувствительного коэффициента γ в формуле для дол-

говечности $\tau = \tau_0 \times \exp\left(\frac{U_0 - \gamma \times \sigma}{k \times T}\right)^{16/}$. Для этого сравним опытные данные по радиационной долговечности неотожженных и отоженных образцов, приведенные на рис. 3 и 4. Видно, что при экстраполяции линейных участков кривых $\ln \tau_j(\sigma)$ к нулевому напряжению на рис. 3 для неотожженных образцов и на рис. 4 для отоженных образцов значения $\ln A_j$ оказываются по порядку величины близкими. С другой стороны, наклоны этих прямых различаются, т.е. для отоженных и неотожженных образцов коэффициенты a_j заметно отличаются друг от друга. Это означает, что коэффициент a_j оказывается структурно-чувствительным, а A_j - структурно-нечувствительным. Что касается количественной связи a_j с γ , то этот вопрос требует для своего выяснения дополнительных экспериментов /возможно, что они пропорциональны, как и в случае ультрафиолетового облучения^{16/}.

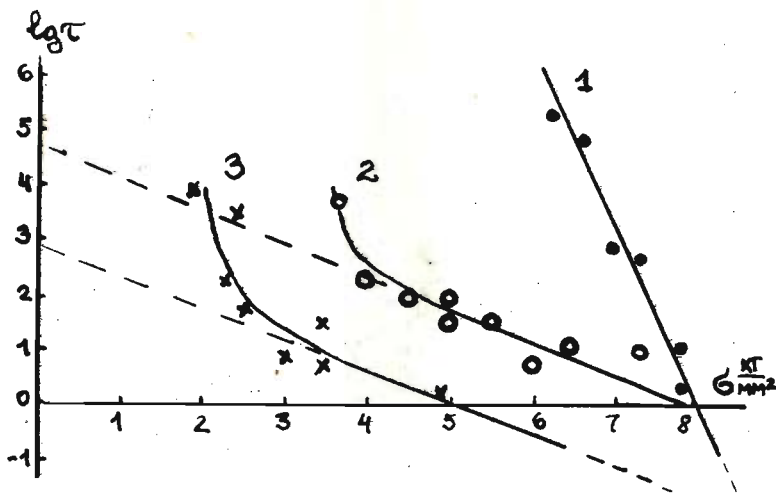


Рис. 4. Зависимость долговечности от напряжения при постоянной температуре для отоженного алюминия. 1 - без облучения; 2 - $j = \times 10^{11}$ ион/с; 3 - $j = 3 \times 10^{11}$ ион/с.

В заключительном анализе результатов, представленных на рис. 3 и 4, следует обратить внимание на то, что при малых напряжениях наблюдается отклонение зависимости $\ln \tau_j(\sigma)$ от линейной /явление, аналогичное "загибам" кривых $\ln \tau(\sigma)$ в области малых σ для других материалов^{16/}. Такого поведе-

ния указанных кривых в области малых напряжений следовало ожидать по ряду соображений, и, в частности, потому, что в отсутствие напряжений облучение, как известно, упрочняет алюминий^{19/}.

Рассмотрим теперь результаты измерений радиационной ползучести алюминия, представленные в табл. 1 и 2. Опыт показал, что для алюминиевых образцов в первом приближении под облучением выполняется выражение:

$$\dot{\epsilon}_{j \text{ уст.}} \times \tau_j = \text{const} = \Delta \epsilon_j \quad /2/$$

Пользуясь этим выражением, можно оценить значения скоростей установившейся ползучести по формуле:

$$\dot{\epsilon}_{j \text{ уст.}} = \frac{\Delta \epsilon_j}{\tau_j} \quad /3/$$

В табл. 1 приведены рассчитанные таким образом значения скоростей ползучести.

Сравнение величины $\Delta \epsilon_j$ со значением $\Delta \epsilon$, полученным для таких же образцов на той же установке, в опытах без облучения показало, что они близки, хотя имеется тенденция к увеличению $\Delta \epsilon_j$ по сравнению с $\Delta \epsilon$. Эта тенденция особенно ясно проявилась в опытах с отоженными образцами, для которых накопленная деформация на стадии установившейся ползучести под облучением была больше, чем в экспериментах без облучения. Однако чтобы сделать окончательный вывод о соотношении величин $\Delta \epsilon_j$ и $\Delta \epsilon$, необходима дополнительная экспериментальная информация.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Найденная в настоящей работе закономерность для силовой зависимости радиационной долговечности алюминия с учетом литературных данных схематически изображена на рис. 5. Согласно этой схеме, радиационная долговечность /или величина, обратная скорости установившейся радиационной ползучести $\frac{1}{\dot{\epsilon}_j}$ / при достаточно больших напряжениях ($\sigma > \sigma_{гр.}$) не отличается от долговечности без облучения /участок кривой ВС/ и описывается формулой /16/. При меньших напряжениях /участок кривой СД/ радиационная долговечность становится значительно меньше долговечности без облучения и ее временная зависимость описывается формулой /1а/. При дальнейшем снижении напряжения линейная зависимость $\lg \tau_j(\sigma)$ нарушается, радиационная долговечность приближается к долговечности без облучения /участок кривой ДЕ/, и в конце концов может даже превысить ее /участок ЕГ/, когда упрочняющее действие вносимых

радиацией устойчивых дефектов превышает разупрочняющее влияние радиации в поле механических напряжений. Для алюминия, в частности, известно, что облучение без нагрузки ведет к упрочнению металла.

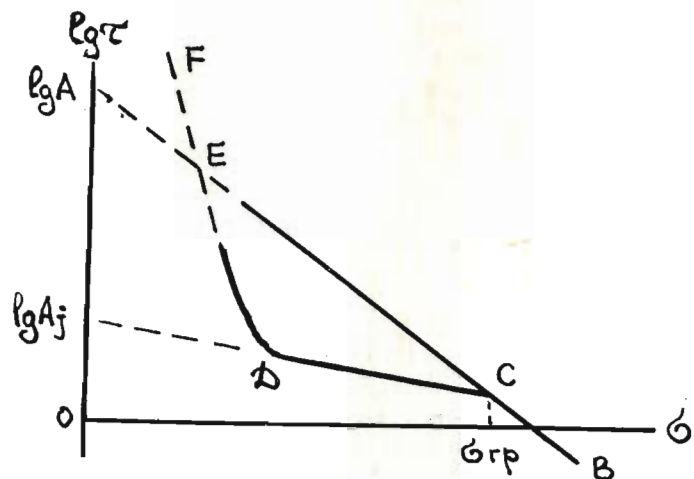


Рис. 5. Схема силовой зависимости радиационной долговечности от напряжения

Следует отметить, что представленную на рис. 5 силовую зависимость радиационной долговечности можно считать общей для самых различных по строению и свойствам материалов и различных излучений. Действительно, силовая зависимость долговечности, соответствующая схеме рис. 5, наблюдалась при исследовании полимеров под действием квантов ультрафиолетового излучения^{/6/}, γ -облучения^{/10/}, облучения потоками электронов, нейтронов^{/11,12/}. На различных металлах также наблюдались подобные закономерности^{/3/}. Подобные данные были получены в ряде других работ^{/1-5/}. Укажем еще, что эффект обратимого изменения скорости ползучести, аналогичной приведенному на рис. 2, наблюдался также на разных материалах и при разных видах облучения^{/1-5,11/}.

Следует подчеркнуть тот факт, что действие радиации на материалы, подвергающиеся действию механических напряжений, коренным образом отличается от действия радиации на ненапряженный материал. В первом случае радиация ослабляет материал,

ускоряет в нем развитие процесса разрушения и ползучести, во втором случае, наоборот, упрочняет материал, вводя в него дефекты, препятствующие движению дислокаций и развитию трещин. Поэтому исследования действия радиации на кинетику деформирования и разрушения различных материалов в поле механических напряжений целесообразно выделить в особый раздел задач радиационного материаловедения.

Общность закономерностей радиационной ползучести и долговечности, иллюстрируемая рис. 5, рис. 3,4 и формулами /1,2/, должна учитываться при построении теорий температурно-силовой зависимости радиационной долговечности и ползучести различных твердых тел.

Прежде чем обращаться к теориям, рассматривающим атомный механизм радиационных воздействий на различные материалы, можно вначале высказать общие соображения кинетической концепции прочности^{/8/} твердых тел, которые объясняют вид силовой зависимости радиационной долговечности /рис. 5/ и причины перехода кривой от участка BC к CD, т.е. причины излома зависимости $lg \tau_j(\sigma)$ в точке $\sigma = \sigma_{гр}$ ^{/8/}. Простое предположение о суммировании двух разных скоростей накопления повреждений, одна из которых, V_j , вызывается радиацией, а другая, $V_{Тф}$, термофлуктуационным механизмом разрушения, объясняет вид зависимости $lg \tau_j(\sigma)$ на рис. 5. Действительно, если для простоты считать, что V_j и $V_{Тф}$ независимы друг от друга и аддитивно складываются, то суммарная скорость разрушения будет равна:

$$V_{сумм} = V_j + V_{Тф} \quad /4/$$

Учитывая, что зависимость $V_{Тф}$ от σ экспоненциальная и более сильная, чем зависимость V_j от σ , ясно, что должны соблюдаться следующие соотношения:

$$\text{при } \sigma > \sigma_{гр} \quad V_{сумм} = V_{Тф} \quad , \quad \text{при этом } V_{Тф} \gg V_j \quad /5a/$$

$$\text{при } \sigma < \sigma_{гр} \quad V_{сумм} = V_j \quad , \quad \text{при этом } V_j \gg V_{Тф} \quad /5б/$$

и следовательно, должны соблюдаться закономерности /1а/ и /1б/, соответствующие зависимостям $lg \tau_j(\sigma)$, приведенным на рис. 3,4 и 5.

Поскольку в наших экспериментах пока не исследовалась температурная зависимость радиационной долговечности и ползучести, мы не имеем возможности привести эмпирическую зависимость V_j от T . В то же время установленный выше факт, что скорость радиационного разрушения сильно зависит от интенсивности ионного потока, а не от флюенса, позволяет сделать предположение о том, что определяющее влияние на процессы разрушения /и ползучести/ оказывают не статические, а неустойчивые, короткоживущие радиационные дефекты, играющие роль так называемых "горячих точек". Гипотеза о "горячих точках" была пред-

ложена еще в ранних работах по изучению влияния реакторного излучения на ползучесть полимеров^{/12/}. Аналогичные предположения в несколько измененном виде высказывались позднее^{/13/}. Не останавливаясь здесь подробно на анализе разных гипотез, ограничимся в заключение ссылкой на недавно предложенную В.Л.Инденбом новую теорию радиационно-стимулированной ползучести^{/14/}. В этой теории, в конечном счете, также предполагается, что в результате "радиационной тряски" имеют место локальные нагревы материала и оценивается эффективная температура T^* , вызывающая радиационно-стимулированные процессы. В основу этой новой теории положено предположение о том, что для кинетических процессов в кристаллах необходимо учитывать роль неустойчивых радиационных дефектов - френкелевских пар - с временем жизни порядка $10^{-11} - 10^{-12}$ с. Ранее любые радиационные явления в твердых телах пытались, как правило, сводить к анализу кинетики устойчивых радиационных дефектов, сохраняющихся в материале после облучения. В^{/14/} предполагается, "что именно неустойчивые "мерцающие" френкелевские пары определяют механизмы важнейших радиационных явлений, ибо каждая пара, рождаясь и затем "захлопываясь", испускает медленно затухающую с расстоянием продольную волну, способную вызывать надбарьерное перемещение диффузанта или дислокации".

Для проверки этой теории, помимо экспериментов на ЭВМ^{/14/} можно предложить еще и опыты по исследованию температурно-силовой зависимости радиационной долговечности /и ползучести/ с использованием для этой цели методики, изложенной в настоящей работе. В таких опытах можно оценить значение эффективной температуры T^* и сравнить ее с предсказанной теорией.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить академика Г.Н.Флерова за постоянный интерес к работе и обсуждение результатов экспериментов, Ю.А.Федорова и С.Э.Борискина за помощь в экспериментах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Реакторное материаловедение. Труды конференции по реакторному материаловедению. Алушта, 29 мая - 1 июня, 1978, М., ЦНИИАтоминформ 1978, т.1-6.
2. Иванов Л.И., Лазаренко В.М., Мартишин О.В. Физ. и хим. обработки матер., 1978, № 3,3.
3. Hudson J.A., Nelson R.S., McErlroy R.J. J. Nucl.Math., 1977, 65, p.279.

4. Писаренко Г.С. и др. Сб. Радиационные эффекты изменения механических свойств конструкционных материалов и методы их исследования. Киев, Наукова Думка, 1977, 3, с.3.
5. Jeppson M.R. et al. J.Appl.Phys., 1955, 26, p.365.
6. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел, М., Наука, 1974.
7. Инденбом В.Л., Орлов А.Н. ФММ, 1977, 43, № 3, с.469.
8. McErlroy R.J., Hudson J.A., Nelson R.S. Proc.Int.Coll.on Measurement of irradiation enhanced creep in nucl.matter, 1976.
9. Конобеевский С.Т. Действие облучения на материалы, М., Атомиздат, 1967.
10. Нарзуллаев Б.Н., Каримов С.Н. ДАН ТаджССР, 1964, 7, 6, с.145.
11. Мокульский М.А. и др. Высокомол.соед., 1960, 2, 1, с.103.
12. Мокульский М.А. Высокомол.соед., 1960, 2,1, с.119.
13. Самойлов Г.Г., Томашевский Э.Е. ФТТ, 1968, 10, 10, с.3039.
14. Инденбом В.Л. Письма в ЖТФ, 1979, вып. 5, 5, с.489.
15. Rev. of Modern Physics, 1975, 47, No.3, S.22.

Рукопись поступила в издательский
отдел 17 августа 1979 года.