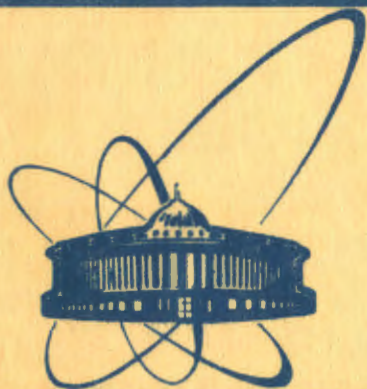


27/II-84



**сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна**

1177/84

18-83-791

**В.Д.Афанасьев, Е.Д.Воробьев, Ю.И.Гофман,
С.П.Корнилов, С.А.Письменецкий, Н.Н.Чернявский,
И.И.Чкалов, В.А.Щеголев**

**РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В АЛЮМИНИИ
ВО ВРЕМЯ ОБЛУЧЕНИЯ
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ ИОНАМИ УГЛЕРОДА**

1983

Как известно, изучение релаксации напряжений позволяет анализировать элементарные механизмы пластической деформации. При этом определяются термоактивационные параметры, разделяются компоненты приложенного напряжения. В последнее время развиваются исследования релаксации напряжений в металлах под действием облучения - радиационной релаксации напряжений, в которых определяется скорость радиационной ползучести^{/1, 2/}. В настоящей работе изучалась релаксация напряжений в алюминии под действием облучения высокоэнергетическими ионами углерода после нагружения образца в испытательной машине.

В нагруженном силовом контуре после остановки испытательной машины суммарная длина его элементов и образца /системы "образец-машина"/ фиксирована. Следовательно, удлинение образца в этом случае должно привести к сокращению элементов силового контура, в частности динамометра. А это, в свою очередь, может быть зарегистрировано как спад нагрузки. В работе^{/3/} показано, что в описанном выше случае релаксация напряжений в испытываемом образце описывается уравнением

$$\dot{\epsilon} = -\frac{\dot{\sigma}}{M} \quad /1/$$

где $\dot{\epsilon}$ - скорость пластической деформации образца, $\dot{\sigma}$ - скорость релаксации напряжений в нем, а M - эффективный модуль системы "образец-машина". При этом

$$M^{-1} = E^{-1} + Z^{-1}l_0^2S, \quad /2/$$

где E , l_0 , S - соответственно модуль упругости, рабочая длина и площадь поперечного сечения образца, а Z - жесткость испытательной машины.

Если релаксационные испытания проводятся в таких условиях, когда радиационная релаксация может давать основной вклад в измеряемую релаксацию напряжений и скорость радиационной ползучести $\dot{\epsilon}_p$ на установившейся стадии описывается соотношением

$$\dot{\epsilon}_p = KG\sigma, \quad /3/$$

где G - скорость дефектообразования, σ - приложенное напряжение, а K - модуль радиационной ползучести, можно, подставив ^{/3/} в ^{/1/}, получить для радиационной релаксации напряжений

$$\Delta\sigma_p(t) = \sigma_0(1 - e^{-MKGt}). \quad /4/$$

Здесь $\Delta\sigma_p(t) = \sigma_0 - \sigma(t)$, где σ_0 - напряжение в начальный момент релаксации $t = 0$.

Для времен релаксации $t \ll (\text{МКГ})^{-1}$ выражение /4/ можно представить в виде

$$\Delta\sigma_p(t) = \sigma_0 \text{МКГ}t. \quad /5/$$

Или с учетом /3/ получаем из /5/, что при $t = 0$

$$\dot{\epsilon}_p(0) = \frac{\Delta\sigma_p(t)}{Mt}, \quad /6/$$

Формулой /6/ можно воспользоваться и для оценки скорости радиационной ползучести на неустановившейся стадии.

Как следует из /6/, для определения скорости радиационной ползучести необходимо знать эффективный модуль системы "образец-машина" M . Его можно найти способом, подобным предложенному в работе /4/ для определения жесткости испытательной машины. Образец, нагруженный в машине до уровня напряжения, при котором в дальнейшем будет измеряться релаксация, нагревается, например, электрическим током. Тогда тепловое расширение образца Δl_T при нагреве его на ΔT приведет к сокращению силового контура машины с динамометром Δl_M . При этом за счет уменьшения напряжения в образце произойдет его сжатие на величину $\Delta l_{упр}$. При фиксированной длине системы "образец-машина"

$$\Delta l_1 - \Delta l_M = \Delta l_{упр}, \quad \text{или} \quad /7/$$

$$\alpha \Delta T l_0 = \frac{\Delta P}{Z} + \frac{\Delta P}{SE} l_0, \quad /8/$$

где α - коэффициент теплового расширения, ΔP - падение нагрузки при нагреве образца.

Вынося в правой части /8/ $(\Delta P/S)l_0$ за скобку, получаем

$$M = \frac{\Delta\sigma}{\alpha \Delta T}, \quad /9/$$

где $\Delta\sigma = \Delta P/S$ - спад напряжения при нагреве образца.

Формулы /5/ для радиационной релаксации напряжений и /6/ для скорости радиационной ползучести, как отмечалось выше, справедливы в том случае, когда наблюдаемая релаксация напряжений возникает только вследствие радиационной ползучести. Поэтому экспериментально необходимо создать такие условия, при которых пластическая деформация осуществляется за счет радиационной ползучести. Их можно реализовать, например, вблизи насыщения кривой термоактивированной релаксации или после остановки испытательной машины в упругой области. Температура при этом не должна превышать $0,5T_{пл}$ /5/.

Методика эксперимента была ранее описана /6/. Облучение ионами углерода проводилось на ускорителе У-200 Лаборатории ядерных

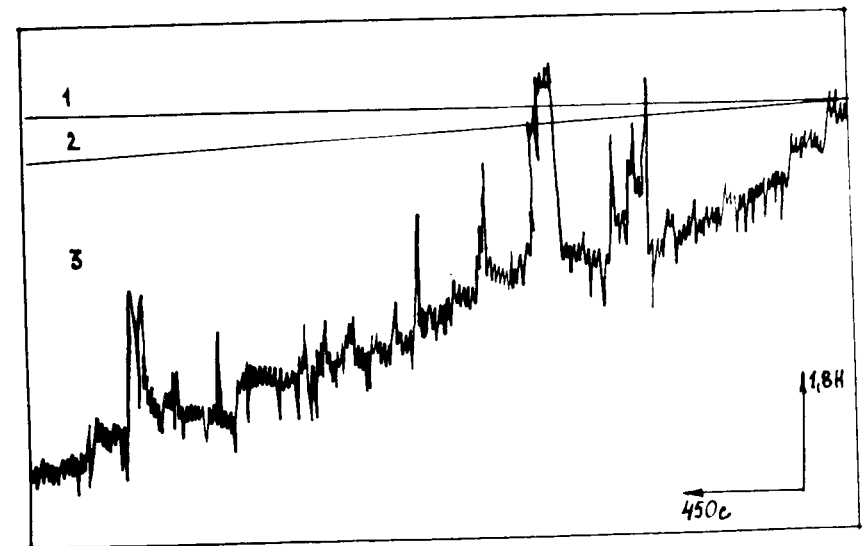


Рис.1. Спад уровня нагрузки во времени после остановки испытательной машины без облучения и аппаратного дрейфа /1/, без облучения и с дрейфом /2/, при постоянном среднем токе ионов углерода /3/.

реакций ОИИ. Энергия ионов на выходе ускорителя составляла 110 МэВ. Использовались два режима облучения: в одних экспериментах облучение проводилось при постоянном среднем токе ионов, в других величина среднего тока ионов изменялась с периодом 9 с и глубиной модуляции 50%. Для приготовления образцов использовался холоднокатанный алюминий чистотой 99,99%. Толщина образцов находилась в пределах 75-90 мкм, что составляет примерно половину пробега ионов в алюминии. Эксперименты проводились в температурном интервале $0,3-0,35T_{пл}$; исследуемый диапазон напряжений составлял 0,2-0,9 предела упругости. Анализ и обработка релаксационных кривых проводились на участках машинных диаграмм, соответствующих временам 600 с и более после начала облучения. Это связано с временем установления стационарного дрейфа теплового режима при облучении. Величина аппаратного дрейфа определялась двумя независимыми способами: по сравнению уровней нулевой нагрузки до и после облучения и по модельным экспериментам, в которых нагруженный образец нагревался электрическим током и изучался спад нагрузки во времени.

Рассмотрим теперь результаты экспериментов. На рис.1 представлен участок кривой спада нагрузки в зависимости от времени облучения /кривая 3/. На фоне монотонного изменения нагрузки видны колебания уровня нагрузки, связанные с резкими кратковременными изменениями среднего тока ионов. Горизонтальная пря-

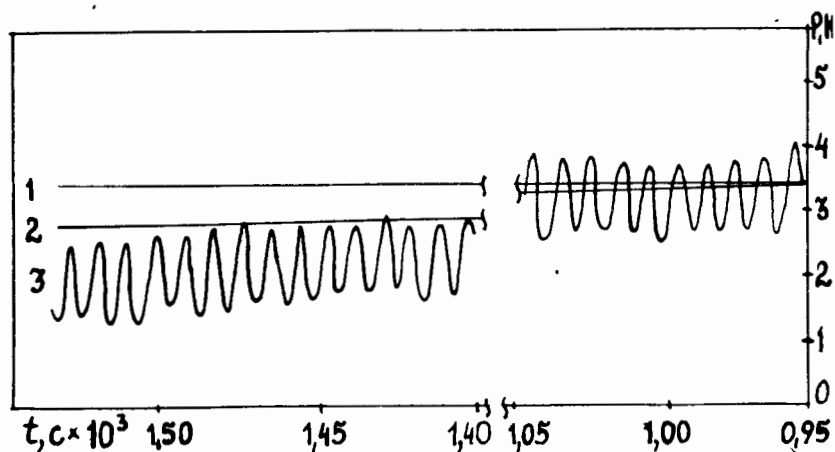


Рис.2. Спад уровня нагрузки во времени после остановки испытательной машины без облучения и аппаратного дрейфа /1/, без облучения и с дрейфом /2/, при модулированном среднем токе ионов углерода /2/.

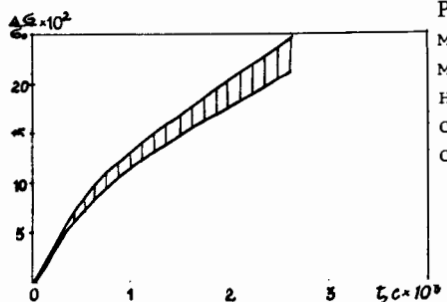


Рис.3. Область возможных значений радиационной релаксации напряжений, полученная из данных рис.1.

мая 1 показывает постоянный уровень нагрузки, который должен наблюдаться после остановки испытательной машины в пределах упругой области в отсутствие облучения и аппаратного дрейфа. Прямая 2 - то же самое при наличии аппаратного дрейфа, имеющего место в этом эксперименте. Из рис.1 видно, что облучение приводит к спаду нагрузки, который значительно превышает величину дрейфа экспериментальной методики. На рис.2 представлены те же кривые, но для случая модулированного облучения.

На рис.3 показана область возможных значений радиационной релаксации напряжений, полученная на основе анализа кривых, приведенных на рис.1. Верхняя граница этой области находилась путем сглаживания по изотермическим точкам кривой 3 рис.1 без учета аппаратного дрейфа и нижняя граница - с учетом дрейфа.

В таблице приведены начальные уровни напряжений релаксационных кривых σ_0 , скорости дефектообразования G , рассчитанные без учета вклада ядерных реакций, скорости радиационной ползучести $\dot{\epsilon}_p$, вычисленные с использованием формулы /6/ по данным анализа кривых радиационной релаксации напряжений, а также скорости радиационной ползучести, приведенные к единичной скорости дефектообразования $\dot{\epsilon}_p/G$. На рис.4 показана построенная по данным

Таблица

Характеристики радиационной ползучести

σ_p МПа	$G \times 10^8$ снах с ⁻¹	$\dot{\epsilon}_p \times 10^7$ с ⁻¹	$\dot{\epsilon}_p/G$ сна ⁻¹	Примечания
15	3,6	1,7 \pm 0,6	4,7 \pm 1,7	модулированное облучение
19	3,0	1 \pm 0,4	3,3 \pm 1,3	"-
30	2	1,8 \pm 0,6	9 \pm 3	"-
69	4,5	2,6 \pm 0,9	5,8 \pm 2	облучение при постоянном среднем токе ионов

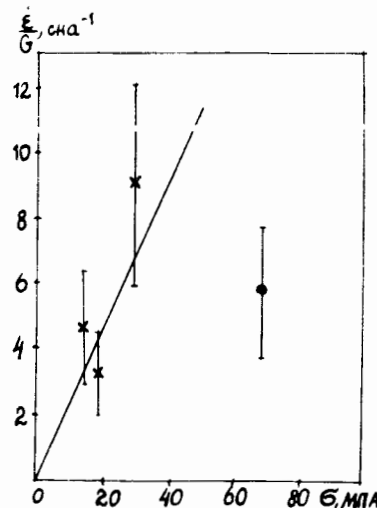


Рис.4. Зависимость скорости радиационной ползучести, нормированной на скорость дефектообразования, от начального уровня напряжений релаксационных кривых / ● - облучение при постоянном среднем токе ионов углерода, × - модулированное облучение/.

таблицы зависимость $\dot{\epsilon}_p/G$ от σ_0 . Видно, что эта зависимость не противоречит известной из литературы линейной зависимости скорости радиационной ползучести от напряжения^{1,2/}.

Таким образом, в работе анализировался метод изучения радиационной ползучести по радиационной релаксации напряжений. Приведены экспериментальные кривые радиационной релаксации напряжений в холоднотемпературном алюминии при облучении высокоэнергетическими ионами углерода. В результате обработки этих кривых получены скорости радиационной ползучести при различных уровнях напряжения.

Авторы выражают благодарность В.Р.Регелю за полезные замечания при обсуждении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Causey A.R., Carpenter G.J.C., McEwen S.R. J.Nucl.Mat., 1980, vol.90, No.1-2, p.216-223.
2. Круглов А.С. и др. Внутрореакторная ползучесть стали 09Х16Н15М3В при температуре 350-550°C. В кн.: Радиационные дефекты в металлах. "Наука", Алма-Ата, 1981, с.136-145.
3. Guin F., Pratt P.L. phys.stat.sol., 1964, vol.6, No.1, p.111-120.
4. Лепин Г.Ф., Костюк В.Л. Заводская лаборатория, 1978, №4, с.480-481.
5. Пятилетов Ю.С. ФММ, 1982, т.54, вып.6, с.1080-1087.
6. Афанасьев В.Д. и др. Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. Харьков, 1983, вып.1/24/, с.71-76.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 ноября 1983 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги,
если они не были заказаны ранее.

	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
D11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
D4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
D4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
D2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
D10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
D1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
D17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
D1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризаационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
P18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
D2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
D9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
D3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
D2,4-83-179	Труды V Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Дубна, 1982.	4 р. 80 к.
	Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1982 /2 тома/	11 р. 40 к.
D11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Афанасьев В.Д. и др.
Релаксация напряжений в алюминии во время облучения высокоэнергетичными ионами углерода

18-83-791

В работе изучалась релаксация напряжений в холоднотемпературном алюминии при облучении ионами углерода с энергией 110 МэВ. Предлагается метод анализа кривых радиационной релаксации напряжений, полученных при облучении предварительно нагруженного в испытательной машине образца. Форма релаксационной кривой определяется зависимостью скорости радиационной ползучести от напряжения, скорости дефектообразования, а также жесткостью системы "образец-машина". Скорость радиационной ползучести находится по глубине релаксации. Экспериментальное изучение релаксации напряжений осуществлялось после предварительного нагружения образца в упругой области. Получены скорости радиационной ползучести. Зависимость скорости радиационной ползучести, нормированной на скорость дефектообразования, от начального уровня напряжения релаксационных кривых не противоречит известной из литературы линейной зависимости скорости радиационной ползучести от напряжения.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Afanasiev V.D. et al.
Stress Relaxation in Aluminium During Irradiation by High Energy Carbon Ions

18-83-791

Stress relaxation on cold-strained Al samples was investigated during the bombardment by 110 MeV carbon ions. A method is proposed to analyse the stress relaxation curves, measured under irradiation on the samples previously stressed in the test apparatus. The time dependence of the relaxation curves is determined by the irradiation relaxation rate as a function of stress, damage rate and by the stiffness of the "sample-apparatus" system. The irradiation creep rate is determined by the relaxation depth. The stress relaxation tests were made after preliminary stress in the elastic region. The rates of stress relaxation have been obtained. The obtained creep rate data, normalized to the damage rates given from the starting stress level of relaxation curves, do not contradict the well-known from the literature linear dependence of creep behaviour upon the stress.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой