

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

5483/82

15/41-82

18-82-558

Е.Д.Воробьев, В.Р.Регель,
Д.Сенеш, В.А.Скуратов

ВЛИЯНИЕ
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНОГО ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ
НА ПОЛЗУЧЕСТЬ АЛЮМИНИЯ

Направлено в "Журнал технической физики"

1982

В работе^{/1/} был обнаружен эффект аномального увеличения скорости ползучести тонких /толщина меньше длины пробега ионов/ образцов алюминия, облучаемых высокоэнергетичными ионами углерода, и сделаны оценки величины скорости установившейся радиационной ползучести $\dot{\epsilon}_j$ для разных значений приложенного напряжения σ разных интенсивностей j . Оценка величин $\dot{\epsilon}_j$ производилась в^{/1/} исходя из предположения, что условие постоянства произведения долговечности на скорость установившейся ползучести остается справедливым и при облучении, то есть, что $\tau_j \cdot \dot{\epsilon}_j = A_j = \text{const}$, подробно тому, как это имеет место при испытаниях без облучения: $\tau \dot{\epsilon} = A = \text{const}$.

Непосредственное измерение скорости ползучести для проверки справедливости условия $\tau_j \dot{\epsilon}_j = \text{const}$, а также детальная регистрация кривых ползучести в работе^{/1/} не были осуществлены с достаточной точностью, так как способ дистанционной регистрации деформации путем измерения поворота оси реохорда, примененный в^{/1/}, оказался ненадежным из-за трения в реохорде. Поэтому основной измеряемой величиной в^{/1/} являлась радиационная долговечность τ_j , а величина $\dot{\epsilon}_j$ определялась как $\dot{\epsilon}_j = A_j / \tau_j$.

В настоящей работе предприняты дальнейшие исследования влияния ионного облучения на кинетику ползучести и долговечности алюминия на основе усовершенствованной методики измерения деформации/с помощью индукционного датчика/. В задачи работы входило: а/ проверка справедливости соотношения $\tau_j \cdot \dot{\epsilon}_j = A_j$ и определение величины A_j путем непосредственного измерения как величины $\dot{\epsilon}_j$, так и τ_j ; б/изучение функциональной зависимости $\dot{\epsilon}_j(\sigma)$; в/ детальная регистрация кривых радиационной ползучести, в особенности на их начальном участке.

Анализируя значения A_j , можно обосновать возможность оценок τ_j по значениям $\dot{\epsilon}_j$ /и наоборот/, а также исследовать взаимосвязь долговечности и скорости ползучести без облучения и при облучении. Интерес к виду функциональной зависимости $\dot{\epsilon}_j(\sigma)$ обусловлен тем, что по нему можно судить о механизме радиационной ползучести.

В результате анализа начального участка кривой деформации можно получить информацию о "неустановившейся" стадии радиационной ползучести, возникающей в момент включения пучка, и сравнить "скачки" деформации при ползучести со "скачками" деформации, наблюдавшимися авторами^{/3/} в опытах по активному нагружению образцов алюминия под облучением при испытаниях на растяжение, а также в работе^{/6/}, где исследовались подобные скачки в опытах на кручение.

ОБЪЕДИНЕННАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

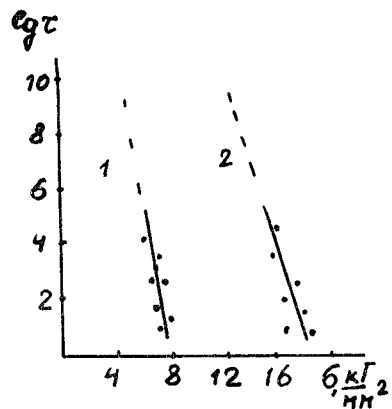


Рис.1. 1 - отожженный алюминий; 2 - упрочненный алюминий.

Помимо того, что дальнейшее изучение кинетики радиационной ползучести и разрушения дает новую информацию о феноменологии и механизме этих процессов и поэтому представляет интерес для общего развития научных основ радиационного материаловедения, следует отметить также, что детальное исследование влияния облучения на механические свойства такого материала, как алюминий, приобрело в последнее время и практический интерес.

Испытания образцов на радиационную ползучесть проводились, как и в /1/, путем облучения нагруженных образцов пучком ионов углерода с энергией около 70 МэВ. Облучение проводилось на ускорителе У-300 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Для регистрации деформации применялся дифференциальный трансформатор, позволяющий надежно регистрировать относительные удлинения образцов с точностью до $5 \cdot 10^{-5}$. Все образцы испытывались при одном значении интенсивности пучка $j = 1,2 \cdot 10^{11}$ 1/см² с.

Температура испытания зависела от разогрева образца током пучка и от условий теплоотвода и составляла при данной интенсивности $55 \pm 3^\circ\text{C}$. Контроль температуры осуществлялся с помощью термпары медь-константан, приклеенной теплопроводящим клеем у нижней лопатки образца.

Изучались, как и в /1/, два типа алюминиевых образцов чистоты 99,99%: отожженные /375°C, 1,5 часа на воздухе/ и упрочненные прокаткой. Форма и размеры образцов были аналогичны описанным в /1/ /толщина - 40-50 мкм/. Интервал рабочих напряжений, при которых испытывались упрочненные образцы, составлял $4,5 \div 10$ кг/мм², а для отожженных - $2,3 \div 3$ кг/мм². Как видно из рис.1, на котором на основании наших измерений и данных работы /2/ приведены графики зависимости долговечности от напряжения в координатах $\lg \tau - \sigma$ при испытаниях аналогичных образцов без облучения, указанным интервалам напряжений соответствуют значения долговечности от 10^{10} с и более. Это означает, что во всех опытах облучение производилось после начальной деформации только на неустановившейся стадии ползучести, поскольку время предварительной деформации t_0 было значительно меньше, чем интервал времени, соответствующий неустановившейся стадии ползучести.

На рис.2а приведен пример кривой ползучести, полученной в одном из опытов /упрочненный образец, $\sigma = 7,93$ кг/мм² /; на

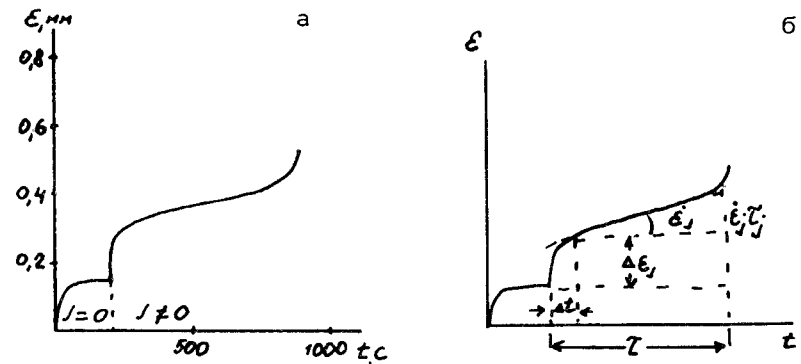


Рис.2. Образец упрочненного алюминия, $\sigma = 7,93$ кг/мм /а/; схематическая кривая ползучести /б/.

рис.2б - схематическая кривая ползучести, характерная для всех проведенных испытаний с обозначениями обсуждаемых в работе величин; t_0 , Δt , r_j , $\Delta \epsilon_j$, $\dot{\epsilon}_j$.

В таблице представлены экспериментальные значения $\dot{\epsilon}_j$ и r_j для отожженных и упрочненных образцов, определенные при разных значениях σ , и рассчитанные значения произведений $A_j = \dot{\epsilon}_j \cdot r_j$. Из таблицы следует, что в данном интервале напряжений значений A_j действительно остается примерно постоянной величиной и составляет $A_j = 0,03 \pm 0,01$ для обоих типов образцов. Это подтверждает правильность предположения о постоянстве произведения A_j , высказанного в /1/. Интересно для сравнения отметить, что для необлученных образцов $A = 0,03 \pm 0,01$, то есть близко по значению к A_j . По данным работы /5/, в которой испытывался алюминий несколько иного состава, чем в настоящей работе, значение A оказывается большим: $A = 0,1$.

Как известно, в настоящее время зависимость $\dot{\epsilon}(\sigma)$ представляется в двух различных формах /5/:

$$\text{степенной } \dot{\epsilon} \sim (\sigma - \sigma_0)^n \quad (T > 0,5 T_{\text{пл}})$$

$$\text{и экспоненциальной } \dot{\epsilon} \sim e^{\nu \sigma} \quad (T > 0,5 T_{\text{пл}})$$

Принято считать, что если ползучесть лимитируется диффузионным механизмом рассасывания дислокационных скоплений путем реползания /5,6/, то ее скорость описывается выражением /1/, если ползучесть определяется движением дислокаций со ступеньками /4/, развалом границ блоков путем выравнивания из них дислокаций /5/ или накоплением трещин /2/, - то выражением /2/.

На рис.3 представлены результаты построения зависимости $\dot{\epsilon}_j(\sigma)$ для обоих типов образцов в полулогарифмических и логарифмических координатах. Анализ данных, приведенных на этом рисунке, показывает, что значения n в /1/ составляют 3,5 и 7 для

Таблица

№	Тип образца	$\sigma/\text{кг}/\text{мм}^2/\dot{\epsilon}_j \times 10^5$	$\tau_j/\text{с}/$	Δ_j	
1	отожж.	2,36	2,67	1860	0,04
2	-	2,57	4,36		
3	-	2,8	10,37	802	0,03
4	упр.	4,53	0,88		
5	-	5,84	2,65	870	0,02
6	-	7,93	4,32	581	0,02
7	-	9,01	16,66	140	0,02
8	-	9,91	40,72	82	0,03

упрочненных и отожженных образцов соответственно. Значения σ_0 , характеризующие уровень внутренних напряжений в образце, составляют для отожженных образцов $\sigma_0 = 0,3 \text{ кг}/\text{мм}^2$, а для неотожженных - $\sigma_0 = 1,5 \text{ кг}/\text{мм}^2$.

Из сравнения рис.3а и 3б видно, что нельзя однозначно определить, какая из двух функциональных зависимостей /1/ или /2/ лучше описывает экспериментальные данные, так как и степенная, и экспоненциальная зависимости примерно с одинаковым разбросом точек описывают результаты эксперимента. Отсюда, казалось бы, следует, что на основе результатов исследований зависимости скорости радиационной ползучести от напряжения при одной температуре нельзя сделать выводов об особенностях радиационного механизма деформирования и разрушения и для этого требуются

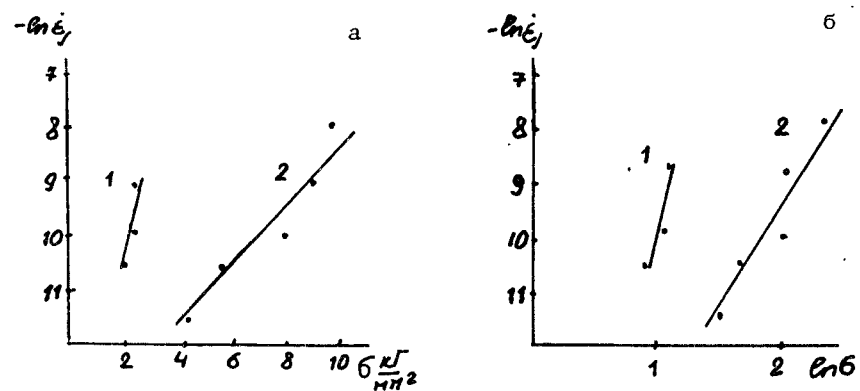


Рис.3. 1 - отожженный алюминий, 2 - упрочненный алюминий.

дополнительные опыты в больших интервалах напряжений, а также при различных температурах. Однако тот факт, что значения $\dot{\epsilon}_j$ при радиационной ползучести совпали со значениями $\dot{\epsilon}_j$ для алюминия, полученными в работе /5/ для ползучести при повышенных температурах $T > 0,5 T_{пл}$, дает основание считать, что для радиационной ползучести скорее справедлива закономерность /1/, чем /2/, и это может указывать на существование при радиационной ползучести локальных разогревов. С другой стороны, это может свидетельствовать о большем вкладе в процесс ползучести диффузии точечных дефектов, вводимых в образец во время облучения.

Таким образом, полученные данные о зависимости $\dot{\epsilon}_j(\sigma)$ можно объяснить двумя различными механизмами, вызывающими увеличение установившейся скорости радиационной ползучести: локальными разогревами, переводящими алюминий из области "пониженных" температур $T < 0,5 T_{пл}$ в интервал повышенных температур $T > 0,5 T_{пл}$, или эффектом инжекции точечных дефектов при облучении. Для выяснения вклада этих двух механизмов требуются дальнейшие эксперименты.

Обсудим результаты исследования начального участка кривой ползучести, полученной в момент включения облучения.

Из вида начального участка кривой радиационной ползучести, приведенной на рис.2а, следует, что после включения пучка ионов в течение времени Δt наблюдается стадия "неустановившейся" радиационной ползучести. Очевидно, общее удлинение образца на этой стадии обусловлено суммарным радиационным и тепловым действием пучка. Оценки увеличения длины образца за счет теплового расширения и изменения модуля упругости, а также модельные, без облучения, эксперименты по изучению участка неустановившейся ползучести при изменении температуры на $30-40^\circ\text{C}$ показывают, что тепловой вклад в общее удлинение образца $\Delta \epsilon_j$ /см. рис.2б/, составляет менее 10%. Время перехода ползучести на установившуюся стадию оказалось примерно одинаковым для всех образцов и составляло 30-40 с для разных значений σ .

Можно отметить еще, что наблюдается некоторая зависимость "скачка" $\Delta \epsilon_j(\sigma)$ от напряжения /см. рис.4/. Видно, что для исследованного интервала напряжений при указанных выше значениях интенсивности пучка и температуры эту зависимость можно считать линейной.

На эффект радиационного скачка деформации $\Delta \epsilon_j$ не было обращено внимания в работе /1/, между тем он заслуживает более подробного рассмотрения и сравнения с результатами наблюдений, приведенными в /3,6/.

В работе /3/ предполагают, что эффект "радиационного скачка" на кривой активного нагружения при идентичных условиях облучения связан с быстропротекающими процессами /например, образованием неустойчивых френкелевских пар /8/, T- вспышками /9/, генерацией ударных волн /10/, а также динамическим преференсом точечных дефектов /11/).

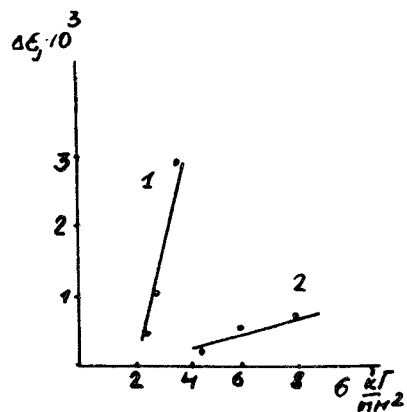


Рис.4. 1 - отожженный алюминий, 2 - упрочненный алюминий.

В работе^{/6/} при исследовании ползучести нержавеющей стали разное возрастание скорости ползучести в начале облучения связывается с ускорением процессов неконсервативного движения дислокаций, согласующимся с моделью, предлагаемой в работе^{/7/}. Согласно этой модели при включении пучка происходит мгновенное увеличение скорости ползучести, вызванное усилением переползания точечных дефектов в металле в момент включения облучения.

По-видимому, результаты наших исследований могут быть объяснены перечисленными в работах^{/3,6/} механизмами. Требуются, однако, дальнейшие исследования для выяснения, какой из перечисленных механизмов играет ведущую роль.

Таким образом, на основе проведенных в настоящей работе экспериментов, по изучению влияния облучения на ползучесть алюминия при растяжении можно сделать следующие выводы: при облучении тяжелыми ионами высокой энергии существенно увеличивается скорость радиационной ползучести $\dot{\epsilon}_j$; уменьшается радиационная долговечность τ_j с сохранением примерного постоянства и их произведения A_j при различных значениях σ . Получены выражения для функциональной зависимости $\dot{\epsilon}_j(\sigma)$, а также данные о виде начального участка кривой радиационной ползучести, включающей скачок деформации.

Эти данные показывают целесообразность использования разработанной методики для постановки дальнейших экспериментов по изучению радиационной ползучести под действием облучения с расширением диапазона напряжений, а также для измерений при различных температурах и с использованием других материалов.

В заключение авторы благодарят академика Г.Н.Флерова и профессора Ю.Ц.Оганесяна за поддержку в постановке экспериментов и интерес к работе, профессора И.Ковача за участие в обсуждении результатов и Ю.А.Федорова за помощь в изготовлении образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Регель В.Р. и др. ОИЯИ, 18-12741, Дубна, 1979.
2. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. "Наука", М., 1974.

3. Афанасьев В.Д. и др. ОИЯИ, 18-80-829, Дубна, 1980.
4. Мышляев М.М. Ползучесть и дислокационная структура кристаллов при умеренных температурах. Препринт ИФТТ, Черноголовка, 1977.
5. Быстров Л.Н., Цепелев А.Б. Физика и химия обработки материалов, 1980, №4, с. 24.
6. McEwen S.P., Fidleris V. Phil.Mag., 1975, No.5, p. 1149.
7. Инденбом В.Л., Орлов А.Н. ФММ, 1977, т. 43, №3, с. 469.
8. Инденбом В.Л. Письма в ЖЭТФ, 1979, 5, с. 489.
9. Каганов М.И., Лифшиц И.М., Танталов Л.В. АЭ, 1959, 6, с. 391.
10. Воловик В.Д., Калинин А.И., Лазурик-Эльцуфин В.Т. Проблемы ядерной физики и космических лучей, 1975, вып.2, с. 100.
11. Березняк П.А. и др. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение, 1979, вып. 2/10, с. 77.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 июля 1982 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

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

Д13-11182	Труды IX Международного симпозиума по ядерной электронике. Варна, 1977.	5 р. 00 к.
Д17-11490	Труды Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1977.	6 р. 00 к.
Д6-11574	Сборник аннотаций XV совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1978.	2 р. 50 к.
Д3-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
Д1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
Д1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
Д4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
Д2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
Д10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
Д1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
Д17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
Д1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
Р18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.

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

Воробьев Е.Д. и др.

18-82-558

Влияние высокоэнергетичного ионного облучения на ползучесть алюминия

Исследована зависимость скорости ползучести тонких образцов алюминия от нагрузки под облучением ионами углерода с энергией 70 МэВ. Показано, что эта зависимость может быть описана формулами $\dot{\epsilon}_j \sim e^{\nu\sigma}$; $\dot{\epsilon}_j \sim (\sigma - \sigma_0)^n$. Обсуждаются полученные данные о "скачках" деформации изучаемых образцов в момент включения пучка.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Vorobiev E.D.

The Effect of High Energy Ion Radiation on Creep of Aluminium

The dependence of creep velocity of thin aluminium samples on loading at irradiating with 70 MeV carbon ions is investigated. It is shown that this dependence can be described by $\dot{\epsilon}_j \sim e^{\nu\sigma}$... $\dot{\epsilon}_j \sim (\sigma - \sigma_0)^n$ formulas. The experimental data on deformation "jumps" of investigated samples are discussed.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982