

Ультразвуковое исследование радиационной стойкости механических свойств конструкционного алюминиевого сплава

И. Х. Абдукадырова

Исследованы механические свойства алюминиевого сплава типа АМГ-2 до и после облучения (гамма-квантами и нейтронами). Методом ультразвукового резонанса и микротвердости изучены значения ряда механических параметров: упругих, твердости и ползучести в исходных образцах, прослежена их устойчивость при облучении набором доз ионизирующего и нейтронного излучения. Установлены особенности радиационного модифицирования некоторых свойств, модулей, коэффициента внутреннего трения, микротвердости и предела текучести, свидетельствующие о нелинейном их характере. Высказано предположение о механизме наблюдаемых процессов изменения упругости и твердости в облученном конструкционном сплаве АМГ-2.

Ключевые слова: механические свойства, упругие и неупругие, модули, твердость, предел текучести, облучение, радиационное модифицирование, алюминий, сплав.

Mechanical properties of a aluminum alloy AMG-2 type are investigated before and after irradiated. By method of ultrasonic resonance and micro hardness studied of the values some mechanical parameters: elastic, hardness and creep in initial samples, observed their stability under usual conditions at the subsequent irradiation by a set of doses of ionizing and neutron radiation. Features of radiation modification of some properties, modules, factor of internal friction, micro hardness and the fluidity limit, testifying its nonlinear character are established. The assumption of the mechanism of observable processes of changed the elastic and hardness in irradiated constructional alloy AMG-2 is suggested.

Keywords: mechanical properties, elastic and no elastic, modules, hardness, fluidity limit, irradiated, radiation modification, aluminum, alloy.

Введение

Проблемы ядерной энергетики остаются актуальными в настоящее время [1, 2]. Особую важность приобретают задачи, связанные с отработанным топливом, созданием надежной сырьевой базы, переходом на низкообогащенное топливо. На исследовательских реакторах проводятся работы по переходу с высокообогащенного топлива (90%) на низкообогащенное (36 и 20% по U^{235}). В качестве материала твэлов тепловыделяющих сборок, стержней регулирования и других узлов активной зоны этих реакторов используются алюминиевые сплавы САВ-1 и АМГ-2.

Цель данной работы — исследование некоторых механических свойств сплава типа АМГ-2 при

воздействии гамма излучения методом ультразвукового резонанса [3].

Методы и объекты исследования

В качестве образцов использовали диски из сплава АМГ-2 диаметром 15 мм и толщиной 2 мм. Свойства сплава изучали акустическим методом ультразвукового резонанса [3], позволяющим получить параметры ультразвукового сигнала, для дальнейшего определения свойств. Данный акустический метод применяли для изучения наличия градиента температур в урановом топливе [4], для измерения акустической эмиссии при ионной имплантации [5] и для других целей [6, 7]. Пластины подвергали воздействию гамма облучения в канале

гамма источника поглощенной дозой от 10 до $2 \cdot 10^7$ Гр.

Результаты и обсуждение

Первоначально механические свойства сплавов АМГ-2 изучали на исходной серии образцов № 1 – 5 методом резонанса при возбуждении в них ультразвуковых колебаний на лабораторной установке [3] в диапазоне частот 20 – 200 кГц. Из полученных спектров изгибных и радиальных форм колебаний определяли спектральные параметры резонансных частот — амплитуду (A) и частоту (f). Затем, по этим результатам, зарегистрированным на каждом из образцов № 1 – 5, вычисляли комплекс упругих характеристик материалов: модуль Юнга (E), модуль сдвига (G) и объемный модуль (B) по следующим формулам:

$$E = \rho \left[\frac{f_u(1,0)d}{Ku(1,0)} \right]^2, \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2 + 2\nu}, \quad (2)$$

$$B = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}, \quad (3)$$

где f_u — частота, Ku — коэффициент упругости, ν — коэффициент Пуассона, ρ и d — плотность и толщина дисков.

Необходимый для расчетов модулей по формулам (1)–(3) коэффициент Пуассона ν находили из следующего соотношения двух низких резонансных частот изгибных колебаний

$$N = \frac{f_u(1,0)}{f_u(0,2)}, \quad M = \frac{Ku(1,0)}{Ku(0,2)} \quad (4)$$

и по соотношению между толщиной и диаметром образцов [3]. Усредненные для пяти использованных исходных образцов сплава значения вычисленного комплекса упругих характеристик представлены в таблице. Поскольку значения этих механических

свойств для сплава АМГ-2 в литературе не приводятся, они сравниваются с данными для чистого алюминия [8] (таблица). Видно, что в сплаве величины модулей E и G несколько больше, а B и ν — меньше, чем в А1. Это обусловлено наличием примесей Mg, Fe, Cu, Si [9] в сплаве и отличиями в структуре.

В качестве меры неупругих свойств алюминиевого сплава использовали относительную ширину резонансной кривой на уровне 0,7. В эксперименте для определения неупругого параметра — внутреннего трения Q^{-1} находили значение одной из интенсивных в спектре ультразвуковых колебаний частоты, при которой амплитуда максимальна (f_{ri}), после чего определяли ширину спектрального пика (Δf_{ri}) и вычисляли неупругий параметр по формуле

$$Q^{-1} = \frac{\Delta f_{ri}}{f_{ri}}. \quad (5)$$

Результаты вычислений приведены в таблице.

Для определения устойчивости механических свойств АМГ-2 образцы выдерживали 2,5 месяца в естественных условиях хранения, повторные измерения резонансных частот изгибных колебаний и расчеты показали отсутствие постэффекта для рассмотренных модулей и старения сплава.

Радиационные эффекты изучали при наборе поглощенных доз ионизирующего излучения (D) от 0,1 до 20 МГр. В таблице приведены экспериментально полученные дозовые зависимости упругих модулей Юнга, сжатия, объемного, коэффициента Пуассона и внутреннего трения. Видно нелинейное изменение от дозы модуля Юнга, сначала снижение при дозе 5 МГр и затем восстановление и стабилизация. Аналогичная радиационная кинетика наблюдается и для модуля сдвига и объемного модуля (таблица). Коэффициент Пуассона практически стабилен во всем диапазоне доз D . Это позволяет сделать вывод, что производимые радиацией дополнительные деформации материала, ответственные за некоторую флуктуацию основных модулей упругости, связанных с процессом расширения и сжатия пластин, не сказываются при распространении акустических волн в данной упругой среде на соотношении низких резонансных частот изгибных колебаний.

Внутреннее трение в зависимости от дозы возрастает. Это характеризует постепенное увеличение поглощения веществом механической энергии и ее диссипацию по мере облучения вплоть до 20 МГр. Обнаруженный после деформации сплава предельной дозой 20 МГр значительный возврат Q^{-1} (таблица) подобен температурному эффекту [10]. В нашем случае это может быть эффект радиационного

Таблица

Дозовая зависимость упругих (E , G , B и ν) и неупругих (Q^{-1}) параметров сплава

Параметр	Доза, Гр					
	0	$3 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^7$
E , ГПа	75,1	74,5	74,1	74,7	75,0	74,5
$\Delta E/E$, %		0,79	1,34	0,53	0,13	
G , ГПа	28,2	28,0	27,8	28,1	28,2	28,0
B , ГПа	73,6	73,0	72,6	73,2	73,5	73,0
ν	0,328	0,328	0,328	0,331	0,331	0,331
Q^{-1} , 10^{-3}	1,52	1,55	1,82	2,41	2,37	1,85

отжига. Обнаруженная радиационная кинетика может быть объяснена механизмом движения дислокаций. Облучение высвобождает дополнительное число дислокаций и ускоряет их движение, что ведет к росту диссипации механической энергии по мере увеличения дозы облучения. Замедление радиационного отжига при увеличении дозы, по-видимому, обусловлено отсутствием дислокационного вклада в неупругий параметр.

Упругие модули металлов и сплавов [11, 12] заметно чувствительны к структуре, ее несовершенствам, дислокациям, примесям, дефектам и могут изменяться под действиями даже незначительной обработки.

Одной из причин радиационной кинетики упругих свойств сплава могут быть релаксационные потери [10], включающие дислокации, дефекты, примеси, фазы внедрения, продукты распада [9]. Предполагается, что закрепление дислокаций дефектами приводит к увеличению упругости материала.

Для модуля Юнга максимальный радиационный эффект составляет величину $\Delta E_1 = 1$ ГПа, а при максимальной дозе облучения $\Delta E_2 = 0,6$ ГПа, что составляет 0,8% и это, видимо, происходит из-за радиационного отжига. Аналогичный эффект установлен для модуля сдвига и объемного модуля: $\Delta G_1 = 0,4$ ГПа и $\Delta G_2 = 0,2$ ГПа, $\Delta B_1 = 1$ ГПа и $\Delta B_2 = 0,6$ ГПа, а коэффициент Пуассона радиационно устойчив. Относительное изменение модуля Юнга представлено в таблице. Видно, что имеется экстремум при $5 \cdot 10^6$ Гр, а при дозе $1,6 \cdot 10^7$ Гр радиационный эффект весьма мал.

Полученные ранее [13] результаты измерения микротвердости H_{μ} реакторно-облученных образцов при различных нагрузках и флюенсах показали, что зависимости твердости также носят немонотонный характер. При нагрузках 0,2 – 0,5 Н твердость максимальна при 10^{16} см⁻², а при 0,7 и 1,0 Н, при дозе 10^{17} см⁻², амплитуда растет и максимум смещается в сторону увеличения флюенса. На радиационный эффект, видимо, накладывается какой-то дополнительный. Таким эффектом может быть поверхностный эффект, величина которого зависит от нагрузки, то есть степени деформирования поверхностного слоя пластин и глубины проникновения индентора. Известно, что при облучении растет число радиационных дефектов и дислокаций [9], а на поверхности создается оксидная пленка, которая при небольших нагрузках на поверхностный и приповерхностный слои может создавать дополнительный вклад в упрочнение материала. Ранее эффект наблюдался в сплаве САВ-1 [13]. В случае АМГ-2 глубина проникновения индентора при $F = 1,0$ Н, по-види-

мому, еще недостаточна для получения аналогичного эффекта, что определяется твердостью сплава.

Из дозовых зависимостей микротвердости и [14] был рассчитан предел текучести сплава. Результаты сравнения дозовых зависимостей изменения микротвердости и предела текучести показывают, что оба параметра с ростом флюенса нейтронов увеличиваются. По-видимому, радиационное упрочнение материала приводит к повышению напряжения, необходимого для относительного сдвига межатомных плоскостей в ГЦК-решетке сплава АМГ-2. Повышение диссипации механической энергии и упрочнение сплава обусловлено актом закрепления и высвобождения дислокаций, что свидетельствует в пользу предположения о дислокационном механизме радиационного упрочнения сплава.

Заключение

Проведено исследование устойчивости резонансных частот изгибных колебаний и упругих модулей алюминиевого сплава АМГ-2 с применением ультразвукового метода. Получены экспериментальные данные о дисперсии собственных частот в ряде исходных образцов. Вычислены точные значения частот, а также величины их упругих констант. Установлена дозовая зависимость модифицирования комплекса упругих и неупругих модулей, твердости и предела текучести в широких пределах поглощенных доз, отмечена их нелинейная кинетика. Механические свойства сплава претерпевают относительно небольшие изменения, свидетельствующие о его перспективности в качестве конструкционного материала атомных реакторов. Обсуждаются особенности модифицирования сплава АМГ-2. Рассмотрена возможность дислокационного механизма радиационного упрочнения сплава.

Литература

1. Гагаринский А.Ю., Игнатьев А.В., Пономарев-Степной Н.Н. и др. Роль ядерной энергетики в структуре мирового энергетического производства XXI в. Атомная энергия 2005, т. 99, вып. 5, с. 323 – 335.
2. Моргунев Е.В. О повышении роли атомной энергетики в России. Альтернативная энергетика и экология. 2007, № 4, с. 119 – 121.
3. Баранов В.М. Ультразвуковые измерения в атомной технике. М.: Атомиздат, 1975, 264 с.
4. Kennedy C.R., Kupperment D.S., Wrona B.J. Acoustic emission from thermal-gradient cracks in UO₂. Phys. Stat. Sol. 1976, v. 38, no. 2, p. 569 – 576.
5. Adliene D., Prabevieius L., Bagauskus A. Acoustic emission induced by ion implantation. Nucl. Instr. and Meth. 1983, v. 209, p. 357 – 362.

6. Helpe C.R., Christians S.S. Acoustic emission produced by the deformation of uranium. Acoustic Emission 1985, v. 4, no. 2/3, p. 5116 – 5118.
7. Виргильев Ю.С., Калягин И.П., Земляникин В.Ф. и др. Графит для высокотемпературного газоохлажденного реактора ГТ-МГР. Атомная энергия, 2007, т. 103, вып. 4, с. 235 – 237.
8. Металлургия и металловедение чистых металлов. Сборник под редакцией В.С. Евстюхина. М.: Атомиздат. 1969, с. 199.
9. Байтелесов С.А., Досимбаев А.А., Салихбаев У.С. и др. Влияние нейтронного излучения на структуру и состав конструкционных сплавов АМГ-2. 7 международная конференция “Ядерная и радиационная физика”, 26 – 29 мая 2007 г., г. Алматы 2007, с. 178 – ???.
10. Ультразвуковые методы исследования дислокаций. Сборник статей под редакцией Л.Г. Меркулова. М.: ИИЛ, 1963, с. 169 – 186.
11. Конозенко И.А., Куликовская М.И., Данильченко Б.А. Влияние γ -облучения на фазовое и структурное изменение в металлах и сплавах, закристаллизованные в поле гамма-квантов. УФН, 1991, т. 161, с. 149 – 169.
12. Алюминиевые сплавы жаропрочные и высокопрочные сплавы. Ответственный редактор И.Н. Фридляндер. М.: Metallurgia, 1966, 352 с.
13. Абдукадырова И.Х., Таджибаев Д.П. Влияние реакторного излучения на микротвердость авиалей. Материалы 2 республиканской конференции молодых физиков Узбекистана. Сборник докладов. 25 – 26 ноября 2008 г., г. Ташкент, 2008, с. 185 – 190.
14. Hawk J.A., Fransk R.E., Wilsdorf H.G. Yield stress as determined from hardness measurements for mechanically alloyed aluminium base alloys. Metallurgical Transactions A. 1988, v. 19 A, p. 2366 – 2369.

Абдукадырова Изиди Хамидовна — Институт ядерной физики АН Республики Узбекистан (г. Ташкент), доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник. Специалист в области физики твердого тела. E-mail: izida@inp.uz.