

Влияние реакторного излучения на микротвердость авиалей типа САВ-1

И. Х. Абдукадырова, Д. П. Таджибаев

Институт ядерной физики АН Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

Проведено экспериментальное исследование микротвердости исходных образцов авиалей типа САВ-1. Изучен процесс радиационного модифицирования данной механической характеристики сплава в результате облучения в каналах ядерного реактора ВВР-СМ. Обнаружена нелинейная зависимость упрочнения материала после реакторного облучения небольшими флюенсами ($10^{15} \dots 10^{18}$ нейтр/см²). Установлено, что величина радиационного эффекта изменения микротвердости авиалей является некоторой функцией значения дозы облучения и нагрузки на индентор. Обсуждаются возможные причины обнаруженного повышения твердости ряда использованных пластин. Предполагается, что наблюдаемое радиационно-индуцированное упрочнение алюминиевых сплавов может быть обусловлено генерацией точечных дефектов и дислокаций, закреплением последних дефектами и продуктами распада фаз внедрения.

Ключевые слова: микротвердость, авиаль, упрочнение, фазы внедрения, флюенс нейтронов, радиационные дефекты, конструкционные материалы, оболочки ТВЭЛОВ.

При изучении механических свойств твердых тел, их микроструктуры, а также для понимания различных физико-механических процессов, которые происходят при тех или иных видах деформации материалов, большое значение имеет возможность использования такого чувствительного к состоянию структуры поверхности и приповерхностного слоя метода, как микротвердость. Это тем более важно при радиационной обработке конструкционных материалов, из которых изготавливают детали и рабочие узлы активной зоны ядерных реакторов.

Несмотря на то что данный метод используется в практике физического эксперимента [1–3], ряд вопросов пока еще не решен. Так, в работах [4, 5] дискутируются вопросы о физических процессах, происходящих при разрушении кристаллов под влиянием индентора, об увеличении трещин и разрушении вокруг отпечатка с ростом нагрузки. Авторы [4–7] уделили внимание оценке величины фотомеханического эффекта в зависимости от режима формирования отпечатка в деформированных областях, механизму его образования. Работы [8, 9] посвящены изучению релаксационных процессов в неорганических стеклах и температурной зависимости микропараметра.

Известно, что различные типы сталей и сплавов широко применяются в ядерных реакторах в качестве конструкционных материалов. Их механические свойства исследуются во многих работах. При этом основное внимание уделяется влиянию радиации, например, на их ползучесть, прочность и др. Заметим, что в литературных источниках приведено мало сведений об изменении механических свойств, в частности микротвердости, алюминиевых сплавов, подвергнутых облучению в реакторе. Так, в [10] рассмотрено изме-

нение свойств и фазового состояния сплава Fe₃Al после нейтронного облучения, в [11] – коррозия оболочек стержней, изготовленных из сплава САВ-1, и появление новых фаз.

Цель настоящей работы – изучить влияние небольших флюенсов нейтронов ($10^{15} \dots 10^{18}$ нейтр/см²) на механические параметры некоторых авиалей. Объектом исследования служили авиали: алюминиевые сплавы типа САВ-1, которые являются перспективным материалом для изготовления оболочек ТВЭЛов тепловыделяющих сборок (ТВС) ядерных реакторов.

Эксперимент проводился в 2008 г. на реакторе ВВР-СМ при мощности 10 МВт и загрузке активной зоны топливом UO₂-Al 36%-ного обогащения по U с ТВС типа ИРТ-3М [12]. Серию образцов № 1, 2 и 3 в виде дисков ($d = 15$ мм, $h = 2$ мм) облучали в вертикальных каналах реактора № 6–8 и № 3–2, расположенных вблизи активной зоны. Плотность потока нейтронов в этих каналах определялась с помощью активационных детекторов, в частности использовалось железо (Fe⁵⁴) с пороговой энергией 3 МэВ. В качестве механического параметра, позволяющего получить сведения о прочностных свойствах сплава, выбрана микротвердость.

Проводились измерения микротвердости ряда образцов (№ 1, 2, 3) алюминиевых сплавов САВ-1 до и после последовательного облучения в реакторе флюенсами нейтронов: $\Phi = 10^{15} \dots 10^{18}$ нейтр/см² (эксперимент осуществлялся на одних и тех же образцах). Для этого использовались прибор ПМТ-3 [1], снабженный четырехгранной алмазной пирамидой с основанием в виде квадрата (угол между гранями у вершины пирамиды равен 136°), и метод Виккерса. Нагрузка на индентор изменялась от 30 до 100 г. Среднее значение микротвердости рассчитывалось по результатам 12 измерений длины диагонали отпечатка пирамиды. Микротвердость определялась по формуле

$$H_{\mu} = 1854P/d^2, \quad (1)$$

где P – вес нагрузки, г; d – диагональ отпечатка, мкм.

Для получения заметного отпечатка пирамиды при вдавливании индентора образец выдерживался под нагрузкой в течение 9 с. Измерение микропараметра с помощью прибора проводилось в естественных условиях окружающей среды: дневное освещение и комнатная температура 25°С. Перед измерением исходные образцы подвергались химико-механической обработке для очистки поверхности, а облученные до 70°С флюенсом нейтронов пластины дополнительно выдерживались месяц для спада наведенной активности.

На рис. 1 представлена зависимость $H_{\mu}(F)$ для исходных образцов № 1, 2 и 3 исследуемых сплавов типа САВ-1, где F – приложенная на поверхности образца нагрузка. Увеличение H_{μ} для всех образцов с ростом нагрузки, по-видимому, связано с изменением прочности, упругих характеристик материалов в зависимости от нагрузки. Наблюдается некоторый разброс значений H_{μ} , который обусловлен микронеоднородностями структуры сплавов.

Оказалось, что по мере увеличения нагрузки на индентор ($F = 0,2 \dots 0,3$ Н) величина H_{μ} изменяется поэтапно. На первом этапе малых нагрузок микротвердость изменяется незначительно, на втором этапе ее рост более ощутим,

на третьем – зависимость асимптотически стремится к насыщению. По-видимому, для этого нужны измерения при больших F ($F > 1$ Н). Сравнительный анализ кривых на рис. 1 показывает, что характер зависимости H_μ от F для образцов № 1–3 сплава САВ-1 при малой нагрузке ($F = 0,2...0,3$ Н) немонотонный, с ее ростом (до $F = 0,5$ Н) он изменяется, так как механический параметр резко увеличивается. Видно, что при этом замедляется процесс нарастания напряжений в образцах. В целом в выбранном интервале нагрузок механический параметр увеличивается ($\Delta H_\mu \approx 0,4$ ГПа). Что касается снижения интенсивности роста параметра и стремления к стабилизации кривых, то это, видимо, свидетельствует об ослаблении зависимости H_μ от F вследствие ее выравнивания на поверхности и в объеме деформированного образца.

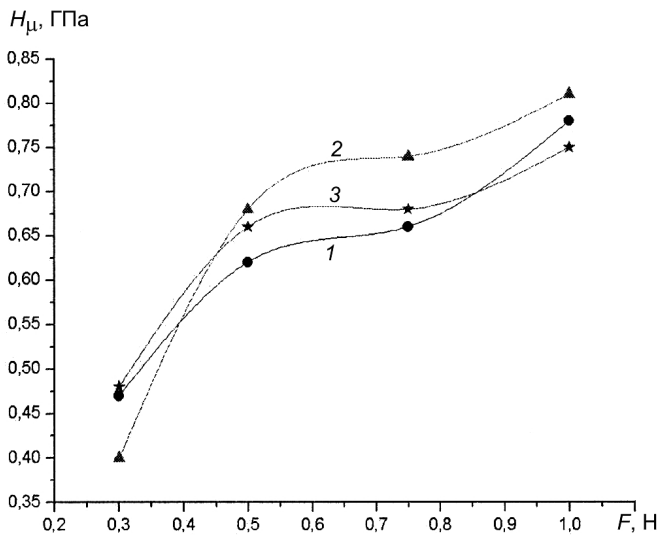


Рис. 1. Зависимость микротвердости исходных образцов № 1 (1), № 2 (2) и № 3 (3) сплава САВ-1 от нагрузки.

На рис. 2 приведена зависимость $H_\mu(F)$ для облученных образцов САВ-1. Видно, что для всех образцов наблюдается упрочнение, однако оно существенно зависит от нагрузки на индентор. При малых нагрузках микротвердость материала резко возрастает с флюенсом (рис. 2), достигая максимума при $\Phi = 10^{17}$ нейтр/см² для $F = 0,5$ Н и $\Phi = 10^{18}$ нейтр/см² для $F = 0,7$ Н.

С дальнейшим увеличением нагрузки микротвердость H_μ уменьшается, хотя ее величина при $F = 1,0$ Н для облученного образца больше, чем для исходного. Вместе с тем при предельной нагрузке характер дозовой зависимости изменяется. На кривых $H_\mu(F)$ отсутствуют скачки параметра и наблюдается постепенное его увеличение по мере облучения сплава (рис. 2). К тому же значение наведенного нейтронами во всем интервале Φ радиационного эффекта почти вдвое меньше, чем, например, при $F = 0,7$ Н.

Установленное в процессе эксперимента упрочнение изученных авиалея при нейтронном облучении может быть обусловлено изменением локального фазового состава, некоторым измельчением микроструктуры, выпадением и

раздроблением интерметаллических фаз. Эти факторы отмечены в исследованиях [13] на основании снятия растровых картин после нейтронного облучения данного сплава, перераспределения примесей, а также при изучении других алюминиевых сплавов [14]. При поглощении энергии нейтронов в объеме образцов возникают радиационные дефекты и механические напряжения, которые могут привести к появлению мелких дислокаций. Последние служат стоками точечных радиационных дефектов и фаз внедрения, что может иметь место в алюминиевых сплавах [14]. Существование подобных стоков, вероятно, может привести к повышению радиационной стойкости алюминиевых сплавов.

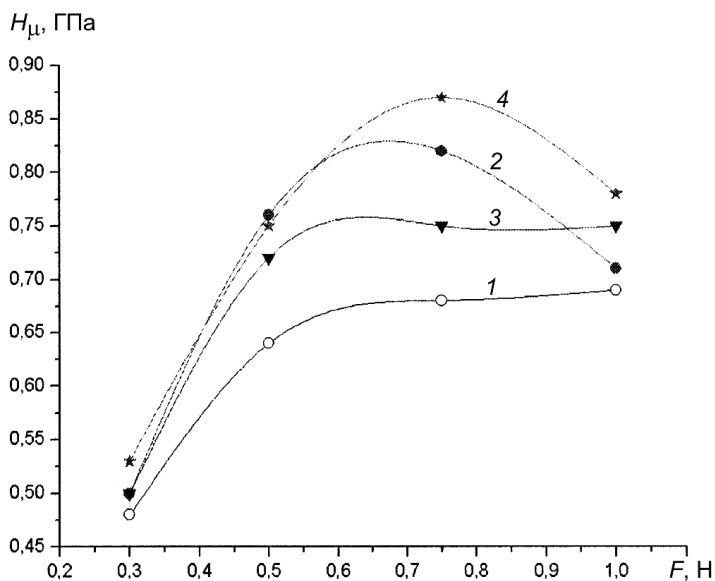


Рис. 2. Зависимость микротвердости от нагрузки на индентор облученных нейтронами образцов сплава САВ-1: 1 – $\Phi = 0$; 2 – $\Phi = 10^{16}$ нейтр/см²; 3 – $\Phi = 10^{17}$ нейтр/см²; 4 – $\Phi = 10^{18}$ нейтр/см².

На основании данных литературных источников [7, 15, 16] отметим, что зависимость $H_{\mu}(F)$ – рис. 2 по-разному изменяется с увеличением нагрузки на индентор и дозы облучения материалов, при этом она может как расти, так и снижаться. Например, в кремнии [7] с повышением нагрузки микротвердость кристалла уменьшается, в различных стеклах [15, 16] при гамма-облучении она увеличивается, а после нейтронного облучения флюенсами ($5 \cdot 10^{16}$ нейтр/см²) стекол – снижается. Эти сведения в какой-то мере согласуются с нашими измерениями в сплавах, так как имеют место аналогия поэтапной кинетики повышения H_{μ} с нагрузкой в необлученном сплаве и некоторый рост при малых нагрузках с ее увеличением в гамма-облученных стеклах. Причину такой неоднозначной кинетики механического параметра авторы объясняют его зависимостью от дефектности и однородности структуры стекла, образования радиационных дефектов при облучении, наличия вблизи поверхности кремния твердого слоя, оказывающего разное влияние на величину H_{μ} .

Таким образом, анализ полученных результатов с учетом приведенных в литературных источниках, обсуждение возможных причин выявленного изменения механических свойств сплавов показывают, что наблюдаемое упрочнение алюминиевых сплавов типа САВ-1 при облучении в вертикальных каналах реактора ВВР-СМ, скорее всего, обусловлено стимулированным процессом образования и роста концентрации радиационных точечных дефектов, дислокаций, их закреплением дефектами и продуктами распада фаз внедрения. Установлено экспериментально некоторое повышение прочности, твердости авиалей типа САВ-1 при обработке малыми флюенсами нейтронов свидетельствует о перспективности их использования в качестве конструкционного материала при изготовлении оболочек твэлов в ядерных реакторах.

Выводы

1. Получены экспериментальные результаты изменения прочности, в частности микротвердости, авиалей САВ-1 до и после нейтронного облучения небольшими флюенсами ($10^{15} \dots 10^{18}$ нейтр/см²). Показано, что микротвердость увеличивается поэтапно в зависимости от нагрузки на индентор. Установлено, что величина радиационного эффекта повышения прочности авиалей является немонотонной функцией значения дозы облучения и нагрузки, которая более ощутима при малой деформации материала.

2. Показано повышение микротвердости в результате радиационного упрочнения образцов сплавов в процессе их обработки в вертикальных каналах ядерного реактора ВВР-СМ. Обсуждаются возможные причины обнаруженного роста твердости этого материала.

3. Предполагается, что основная причина упрочнения облученного в каналах реактора алюминиевого сплава – образование и рост концентрации радиационных точечных дефектов, дислокаций, их закрепление дефектами и продуктами распада фаз внедрения. Сделан вывод о перспективности использования авиалей САВ-1 в качестве конструкционного материала для атомной энергетики.

Резюме

Проведено експериментальне дослідження микротвердості вихідних зразків авіалей типу САВ-1. Досліджується процес радіаційного модифікування даної механічної характеристики сплаву в результаті опромінення в каналах ядерного реактора ВВР-СМ. Виявлено нелінійну закономірність зміцнення матеріалу після реакторного опромінення невеликими флюенсами ($10^{15} \dots 10^{18}$ нейтр/см²). Установлено, що величина радіаційного ефекту зміни микротвердості авіалей являє собою деяку функцію значення дози опромінення і навантаження на індентор. Обговорюються можливі причини виявленого підвищення твердості ряду використаних пластин. Припускається, що радіаційно-індуковане зміцнення алюмінієвих сплавів може бути зумовлене генерацією точкових дефектів і дислокацій, закріпленням останніх дефектами і продуктами розпаду фаз проникнення.

1. Глазов В. М., Вигдорovich В. Н. Микротвердость металлов и полупроводников. – М.: Металлургия, 1969. – 248 с.
2. Григорович В. К. Методы испытания на микротвердость. – М.: Наука, 1965. – 65 с.
3. Харитонов Л. Г. Определение микротвердости. – М.: Металлургия, 1967. – 74 с.
4. Герасимов А. Б., Чирадзе Г. Д., Кутивадзе Н. Г. и др. Влияние режима формирования отпечатка на оценку величины фотомеханического эффекта // Физика твердого тела. – 1998. – **40**, № 3. – С. 503 – 504.
5. Боярская Ю. С., Вальковская М. И. Микротвердость. – Кишинев: Штыница, 1981. – 67 с.
6. Головин Ю. И., Тюрин А. И. О динамике и механизме начальной стадии погружения индентора при микроиндентировании кристаллов // Физика твердого тела. – 1995. – **37**, № 5. – С. 1562 – 1565.
7. Герасимов А. Б., Чирадзе Г. Д., Кутивадзе Н. Г. и др. О распределении величины микротвердости по глубине образца. – Там же. – 1998. – **41**, № 7. – С. 1225 – 1227.
8. Petzold A. Temperaturabhängige Discontinuitäten der Mikrohärte von Glasern // Silikatechnik. – 1975. – **26**, No. 8. – P. 278 – 289.
9. Prodhomme M. Some results concerning the microhardness // Phys. Chem. Glas. – 1968. – **9**, No. 3. – P. 101 – 105.
10. Скаков М. К., Шебалина Т. К. Изменение диаграммы состояний при облучении: Тр. III Междунар. конф. по радиационно-термическим эффектам (Томск 29 июля – 3 авг. 2003 г.). – Томск, 2003. – С. 196 – 198.
11. Максимкин О. П. Радиационное материаловедение в ИЯФ: Тр. VIII Междунар. конф. по физике твердого тела (Алматы, 23–26 авг. 2004). – Алматы, 2004. – С. 73 – 79.
12. Юлдашев Б. С., Салимбаев У. С., Досимбаев А. А., Байтелесов С. А. Эксплуатация и использование реактора ВВР-СМ ИЯФ АН Узбекистана с UO_2 топливом 36%-ного обогащения // Атом. энергия. – 2005. – **99**, вып. 2. – С. 147 – 152.
13. Салимбаев У. С., Досимбаев А. А., Байтелесов С. А. и др. Влияние реакторного излучения на элементный состав и структуру конструкционных материалов типа алюминиевых сплавов САВ-1: Тез. докл. VII Междунар. конф. “Ядерная и радиационная физика” (Алматы, 26–29 мая 2007 г.). – Алматы, 2007. – С. 232 – 233.
14. Ультразвуковые методы исследования дислокаций / Под ред. Л. Г. Меркулова. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – 375 с.
15. Муссаева М. А., Каланов М. У., Ибрагимова Э. М., Муминов М. И. Влияние облучения на микротвердость и фотолюминесценцию SiO_2 // Физика и химия стекла. – 2006. – **32**, № 5. – С. 706 – 716.
16. Бирюков Д. Ю., Зацепин А. Ф., Кортон В. С. Влияние точечных дефектов поверхностного слоя на прочностные характеристики стекол // Там же. – 2001. – **27**, № 4. – С. 503 – 512.

Поступила 05. 02. 2009