

## *Раздел первый*

# **ФИЗИКА РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ЯВЛЕНИЙ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ**

УДК 669.715:539.376

## **ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА РАЗВИТИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ**

*В.В. Брюховецкий, В.П. Пойда\*, А.В. Пойда, В.Ф. Клепиков,  
Д.Е. Педун, Ю.В. Коломак*

*Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины,  
Харьков, Украина*

*E-mail: ntcefo@yahoo.com;*

*\*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина*

Обсуждаются некоторые возможные способы создания сверхпластичного состояния и улучшения показателей сверхпластичности металлов и сплавов путём воздействия на их структуру различного рода излучений. Изучены особенности структурных изменений поверхностного переплавленного слоя образцов алюминиевых сплавов в условиях проявления эффекта сверхпластичности после воздействия релятивистского импульсного пучка электронов.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Проблема сверхпластичности важна как в теоретическом, так и в практическом отношении. Об этом свидетельствует то значение, которое уделяется ей во многих научных центрах высокоразвитых стран. Ведутся разработки, направленные на поиск условий проявления сверхпластичности различными материалами; изучение эволюции микроструктуры при сверхпластической деформации, механизмов деформации и образования пористости; работы по практическому внедрению эффекта сверхпластичности. Проблема сверхпластичности является частью общей проблемы высоко-температурной деформации и разрушения твердых тел, пластичности и хрупкости. Она тесно связана с проблемами радиационного материаловедения.

Как известно, конструкционные материалы ядерных энергетических установок находятся в более сложных условиях, чем в обычных энергетических установках, поскольку разного рода облучение ускоряет процессы ползучести, усиливает временную зависимость прочности, изменяет деформационную способность при повышенных температурах, смещает интервал хладноломкости, вызывает порообразование и радиационное распухание. Если обратиться к результатам, представленным в [1], то отчётливо видно, что при воздействии облучения на материалы в них происходят изменения микроструктуры и фазового состава, которые определяются степенью дефектности кристаллической решетки и эволюцией дефектной структуры в процессе облучения. Среди структурно-фазовых изменений, которые влияют на механические свойства материалов при облучении и в то же время являются факторами, существенно

влияющими на показатели сверхпластичности, можно выделить нижеуказанные процессы. Это – генерация неравновесной концентрации точечных дефектов, образование дефектных зон, эволюция дислокационной структуры и динамическая рекристаллизация, сегрегация примесей на границах, локальные изменения химического состава, распад твердого раствора, фазовые превращения, зарождение пор и эволюция пористой структуры. В настоящей работе приведен как анализ известных из литературы материалов, так и оригинальные исследования авторов, направленные на установление влияния различного рода радиационных факторов на проявление эффекта сверхпластичности.

### **2. НЕЙТРОННОЕ ОБЛУЧЕНИЕ**

Еще из работы [2] известно, что при облучении нейтронами  $\alpha$ -урана наблюдается проявление признаков сверхпластичности. В то же время в [3] было показано, что нейтронное облучение вызывает появление такого структурного дефекта как пористость, которая концентрируется преимущественно по границам зерен. Эти поры возникают вследствие объединения избыточных вакансий, в большом числе создающихся облучением. При больших дозах нейтронного облучения из этих пор развиваются межзеренные трещины и газовые пузыри. Все эти результаты исследований показывают, что дефекты, создаваемые при облучении нейтронами, могут формировать пористую структуру материала, которая может способствовать осуществлению эффекта сверхпластичности.

Известно, что, несмотря на то, что при сверхпластическом течении действуют различные

деформационные процессы – дислокационное скольжение, диффузионный крип и зернограничное проскальзывание – именно последнее является главным деформационным процессом сверхпластического течения, дающего наибольший вклад в сверхпластическую деформацию. В то же время было показано [4], что протекание зернограничного проскальзывания, его интенсивность и величина вклада в общую деформацию тесно связана с процессами порообразования и участия зернограничной пористости в протекании сверхпластической деформации. Было показано [5], что определённый уровень пористости, составляющий 1...7%, обеспечивает сверхпластическое течение, если выполнены температурно-скоростные условия деформирования. Таким образом, одним из возможных факторов, способствующих проявлению эффекта сверхпластичности, может быть создание путем нейтронного облучения пористой структуры, содействующей проявлению этого эффекта.

### 3. СВЕРХЖЕСТКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

В работе [6] было исследовано воздействие сверхжесткого рентгеновского излучения на показатели сверхпластичности низколегированного модельного алюминиевого сплава системы Al-Mg-Cu-Si. Образцы, подвергнутые облучению 10...20 импульсами тормозного рентгеновского излучения, деформировались в ранее определенных условиях сверхпластичности непосредственно после облучения. Результаты исследований облучённых образцов сопоставлялись с таковыми для образцов, не подвергнутых облучению. Было установлено, что после облучения увеличивается скорость сверхпластической деформации и понижается оптимальное напряжение течения. Зависимость удлинения до разрушения  $\delta$  от приложенного напряжения течения  $\sigma$  для образцов, не подвергавшихся предварительному облучению, показана на рис.1 кривой 1.

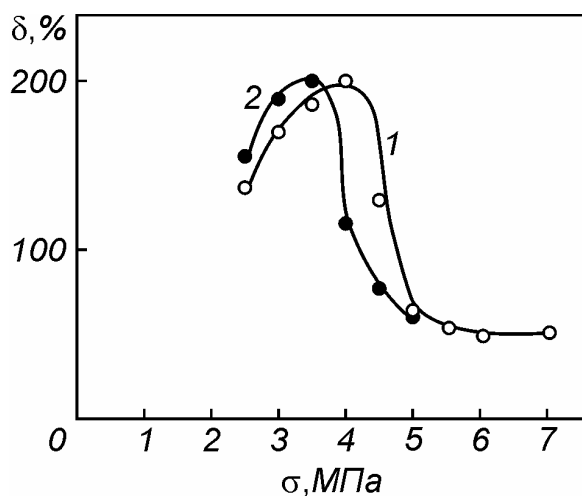


Рис. 1. Зависимости удлинения до разрушения  $\delta$  от приложенного напряжения  $\sigma$  для образцов Al-Mg-Cu-Si (1 – для необлучённых образцов; 2 – для облучённых образцов)

Видно, что максимальное  $\delta = 200\%$  имеет место при  $\sigma = 4,0$  МПа. Температура деформации для образцов этого сплава составляет  $T = 833$  К. Эти условия являются оптимальными для проявления сверхпластичности необлучёнными образцами. Механические испытания облучённых образцов проведены при  $T = 833$  К и  $\sigma = 2,5...4,5$  МПа, т. е. в условиях, включающих в себя оптимальные для проявления сверхпластичности этим сплавом без облучения. Зависимость удлинения до разрушения  $\delta$  от приложенного напряжения течения  $\sigma$  для образцов, подвергнутых облучению, приведена на рис.1 кривой 2. Ход зависимостей  $\delta$  от  $\sigma$  для облучённых и необлучённых образцов примерно одинаков, однако видно, что оптимальные условия проявления сверхпластичности для облучённых образцов сместились в область более низких напряжений течения и реализовались при напряжении  $\sigma = 3,5$  МПа. Установлено, что в одинаковых условиях испытания скорость деформации облучённых образцов почти в два раза выше, чем таковая для необлучённых образцов. Удлинение до разрушения составило при этом 200%. Заметим, что скорость сверхпластического течения облучённых образцов в этих условиях такая же, как и для необлучённых при  $\sigma = 4,0$  МПа.

Исследования зёрновой структуры продеформированных облучённых образцов показали, что она аналогична структуре разрушенных образцов, которые деформировались в тех же условиях без облучения. В обоих случаях в образцах интенсивно развивается деформационная пористость. К моменту разрушения её объём достигает 7...10%.

Наблюдаемое явление, по-видимому, может быть обусловлено увеличением степени неравновесности границ зерен в результате взаимодействия материала со сверхжестким рентгеновским излучением и активизации под воздействием излучения элементарных деформационных процессов, происходящих в условиях сверхпластического течения.

### 4. ИМПУЛЬСНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ ОБЛУЧЕНИЕ

В технологиях обработки различных материалов широко используется воздействие направленных потоков энергии. Одним из вариантов такой обработки является воздействие на материал интенсивных импульсных пучков электронов. Действие такого пучка является комбинированным: ударным, тепловым и радиационным [7-9]. Оно приводит к быстрому нагреву материала и к последующему также относительно быстрому охлаждению за счет отвода тепла внутрь образца. Это же влечет за собой образование в материале значительных концентраций точечных дефектов и может вызвать в нем структурно-фазовые изменения. Такое воздействие на материал весьма перспективно для создания структурного состояния, пригодного для последующего применения технологий обработки, основанных на использовании эффекта сверхпластичности.

В данной работе проводились механические испытания образцов сплава 6111 с длиной рабочей части 10 мм и шириной 4 мм. Они были проведены растяжением на воздухе при постоянном действующем напряжении течения в соответствии с методикой [10]. Испытывали образцы, подвергнутые облучению одним импульсом релятивистских электронов с плотностью потока энергии  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup> (энергия пучка  $E_n \approx 0,35$  МэВ, ток  $I_n \approx 4$  кА, длительность импульса  $\tau_n \approx 5 \cdot 10^{-6}$  с).

На рис. 2, а показан общий вид поверхности пластины, изготовленной из холоднокатаного листа сплава 6111, которая была облучена импульсным высокоэнергетическим релятивистским электронным пучком. Видно, что интенсивный тепловой нагрев пластины, создаваемый пучком релятивистских электронов, привел к оплавлению ее поверхностного слоя. Также известно [11], что некоторые структурные изменения происходят и далее по глубине образца, после переплавленного слоя. Они, прежде всего, связаны с высоким нагревом образца импульсным облучением, а также воздействием жесткого рентгеновского излучения.

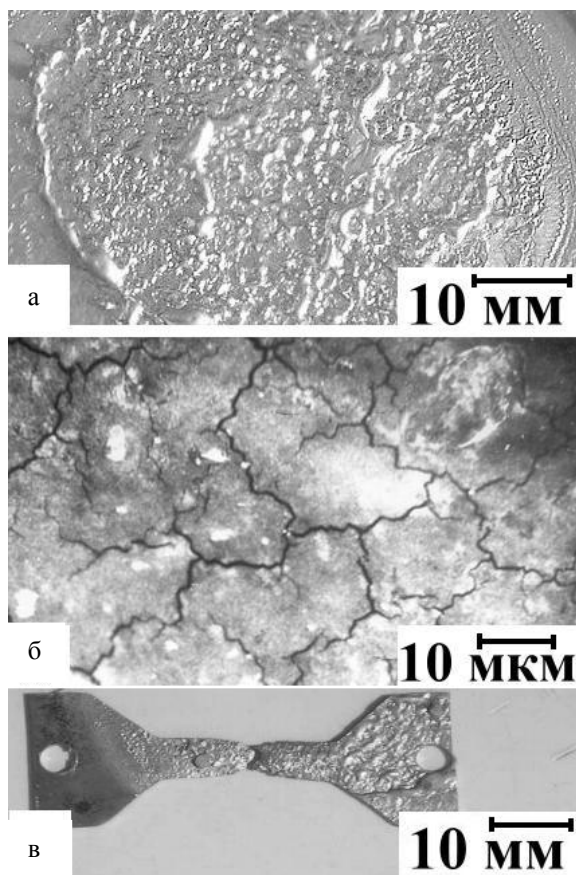


Рис. 2. Вид поверхности пластин из сплава 6111, облученных импульсным высокоэнергетическим релятивистским электронным пучком (а); характерный вид поверхности рабочей части образцов сплава 6111, подготовленных к проведению механических испытаний (б); общий вид образца сплава 6111, вырезанного из облученной пластины и деформированного в условиях сверхпластичности (в)

На рис. 2, б показан характерный рельеф поверхности пластин после облучения. Видно, что интенсивный тепловой нагрев, создаваемый воздействием пучка электронов, приводит к плавлению поверхностного слоя пластин. О наличии значительных внутренних напряжений, возникающих в оплавленном слое в момент его затвердевания, свидетельствует присутствие на поверхности рабочей части образцов протяженных трещин, которые имеют ветвистые (зигзагообразные) участки. Анализ их вида дает основание предполагать, что трещины в поверхностном слое пластины распространялись как по телу, так и по границам зерен. Зигзагообразное распространение трещин, вероятно, связано с локальной неоднородностью прочностных и пластических характеристик материала в различных микрообъемах и, в частности, с локальной неоднородностью распределения легирующих элементов в затвердевшем материале или локальной неоднородностью распределения в приповерхностной зоне частиц интерметаллидных фаз. По-видимому, релаксация внутренних напряжений, возникших в результате воздействия облучения на поверхность пластины из сплава 6111, была не в полной мере осуществлена в ходе кристаллизации оплавленного поверхностного слоя, поэтому оставшиеся внутренние напряжения стали причиной образования трещин.

Общий вид образца сплава 6111, вырезанного из облученной пластины и деформированного в условиях сверхпластичности, показан на рис. 2, в.

Ранее в работе [12] были проведены испытания на сверхпластичность образцов сплава 6111 после облучения импульсным пучком электронов. Однако в этой работе перед механическими испытаниями переплавленный слой на поверхности рабочей части образца был сошлифован. В данной же работе было проведено детальное изучение именно поведения поверхностного переплавленного слоя в условиях сверхпластического деформирования образцов.

Механические испытания сплава проведены при температуре  $T = 773$  К, когда образцы сплава 6111 (как облученные, так и не подвергнутые облучению) демонстрируют наибольшие удлинения до разрушения.

На рис. 3 приведен ряд снимков, сделанных на растровом электронном микроскопе, поверхности рабочей части образца сплава 6111, который был предварительно облучен импульсным пучком электронов, а затем деформирован сверхпластически. Видно, что состояние поверхностного переплавленного слоя после деформации в условиях сверхпластичности отличается от общего состояния деформированного образца. Переплавленный слой имеет множественные разрывы и расслоения. Он как бы скользил по поверхности, которая не была переплавлена в результате воздействия импульсного пучка электронов (см. рис. 3, в). То есть деформационные процессы, происходящие в основной части образца и в переплавленном импульсным пучком электронов слое, принципиально различны. Видимо, эти различия связаны с

различным структурным состоянием переплавленного слоя и основной части образца. По-видимому, сверхпластически течет только основная неплавленая часть образца, в то время как переплавленный слой в данных условиях деформирования просто разделяется на фрагменты, границами которых являются трещины, образовавшиеся после кристаллизации переплавленного слоя.

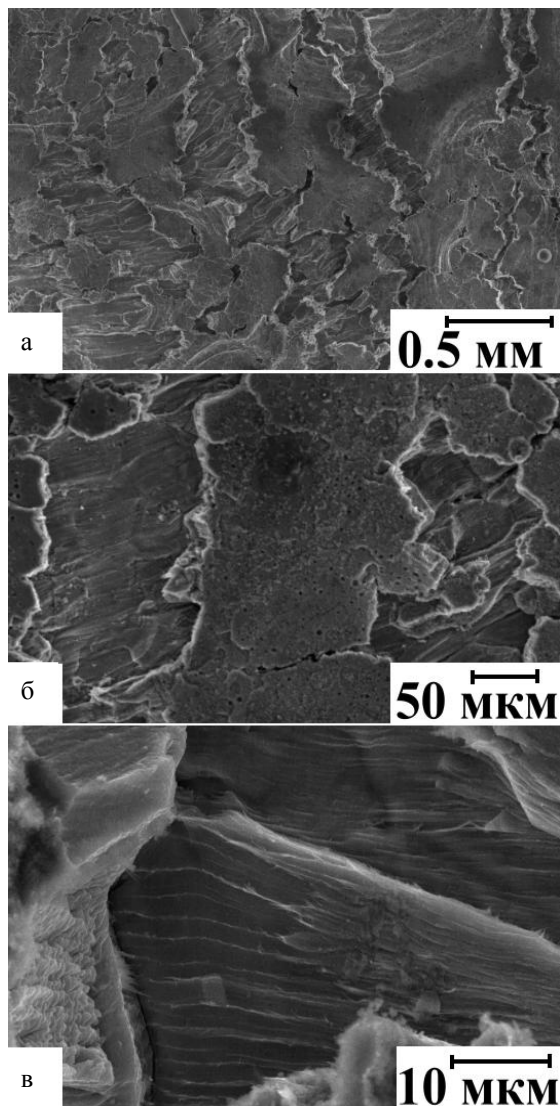


Рис. 3. Различные виды поверхности рабочей части образца сплава B111, предварительно облученного импульсным пучком электронов, а затем продеформированного в условиях сверхпластичности.  
Растровая электронная микроскопия

Таким образом, образцы, вырезанные из облученных пластин, также проявляют сверхпластические свойства. И, несмотря на то, что удлинения до разрушения образцов обоих сплавов до и после облучения остаются практически одинаковыми, скорость течения облученных образцов в оптимальных условиях деформации превышает таковую скорость течения для необлученных образцов более чем в два раза. Возможной причиной этого могут быть как

структурные изменения в неплавленном слое образца, а так же и размерный эффект, связанный с различием в деформационных процессах облученного и необлученного слоев.

## 5. ВЫВОДЫ

1. Радиационное воздействие на материалы может быть важным фактором для создания сверхпластического состояния и улучшения показателей сверхпластичности. Особенно перспективными представляются воздействие ионизирующих излучений на материалы непосредственно во время сверхпластического деформирования. Это может открыть путь к понижению оптимальной температуры сверхпластического течения и, возможно, к увеличению скорости сверхпластической деформации, что представляет значительный практический интерес для технологий металлообработки, которые используют эффект сверхпластичности.

2. Развитие исследований в этом направлении важно также для прогнозирования радиационной стойкости материалов. Возможность реализации эффекта сверхпластичности при высокотемпературной эксплуатации конструкций с одновременным действием облучения требует дальнейших более детальных исследований.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Физика радиационных явлений и радиационное материаловедение* / Под ред. А.М. Паршина, И.М. Неклюдова, Н.В. Камышанченко. Москва-С.Петербург-Белгород, 1998, 378 с.
2. A.C. Roberts, A.H. Cottrell Creep of alpha uranium during irradiation with neutrons // *Phil. Mag.* 1956, v. 1, N8, p. 711-717.
3. С.Т. Конобеевский. *Действие облучения на материалы*. М.: «Атомиздат», 1967, 404 с.
4. В.П. Пойда, Р.И. Кузнецова, А.С. Шапран. Роль зернограницного проскальзывания в пластической деформации пористых поликристаллов. Сверхпластичность // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1985, в. 3(36), с. 47-50.
5. Р.И. Кузнецова. Роль зернограницной пористости в сверхпластичности // *ФММ*. 1978, т. 45, в. 3, с. 641-646.
6. В.Ф. Клепиков, В.В. Брюховецкий, Р.И. Кузнецова, В.П. Пойда, Н.И. Базалеев, В.Ф. Кившик, В.В. Уваров, Н.И. Гапоненко // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2001, №2, с. 31-33.
7. О.В. Богданкевич, А.А. Рухадзе. О возможности создания высокого давления в твердом теле с помощью сильнооточного электронного пучка // *Письма в ЖЭТФ*. 1971, т. 13, в. 9, с. 517-519.
8. Б.А. Демидов, М.В. Ивкин, В.А. Петров и др. Возбуждение ударных волн в толстых мишенях сильнооточным РЭП // *ЖТФ*. 1980, т. 50, в. 10, с. 2205-2208.

9. Е.С. Мачурин. Радиационно-термические технологические процессы обработки металлов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Радиационная техника»*. 1985, в. 3 (31), с. 99-103.

10. В.П. Пойда, Р.И. Кузнецова, Т.Ф. Сухова, Н.К. Ценев, А.И. Письменная. Эволюция пористости и разрушение сплава Al-4,1 мас. % Cu-0,5 мас. % Zr в условиях сверхпластического течения // *Металлофизика*. 1990, т. 12, №1, с. 44-48.

11. В.В. Брюховецкий, Н.И. Базалеев, В.В. Литвиненко и др. Особенности структурообразования поверхности промышленного алюминиевого сплава

6111 в зоне воздействия импульсного пучка электронов в режиме предплавления // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2011, в. 97, №2, с. 28-32.

12. В.В. Брюховецкий, В.В. Литвиненко, В.Ф. Клепиков, Р.И. Кузнецова, В.П. Пойда, В.Ф. Кившик, В.Т. Уваров. Влияние импульсного электронного облучения на параметры сверхпластичности дюралюмина // *Физика и химия обработки материалов*. 2002, №4, с. 33-38.

*Статья поступила в редакцию 06.09.2012 г.*

## **ВПЛИВ РАДІАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ НА РОЗВИТОК ДЕФОРМАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В УМОВАХ НАДПЛАСТИЧНОСТІ**

*В.В. Брюховецький, В.П. Пойда, А.В. Пойда, В.Ф. Клепиков, Д.Є. Педун, Ю.В. Коломак*

Обговорюються деякі можливі способи створення надпластичного стану і поліпшення показників надпластичності металів і сплавів шляхом дії на їх структуру різного роду опромінювань. Вивчено особливості структурного стану поверхневого переплавленого шару зразків алюмінієвих сплавів в умовах прояву ефекту надпластичності після дії релятивістського імпульсного пучка електронів.

## **THE INFLUENCE OF RADIATION FACTORS ON DEVELOPMENT OF DEFORMATION PROCESSES IN SUPERPLASTIC CONDITIONS**

*V.V. Bryukhovetsky, V.P. Poyda, A.V. Poyda, V.F. Klepikov, D.E. Pedun, Yu.V. Kolomak*

Some possible ways to make superplastic state and to improve the factors of superplasticity of metals and alloys by means of the influence on their structure of different kinds of radiation are discussed. The peculiarities of structural state of near-surface remelted layer of specimens of aluminum alloys in superplastic conditions after the influence of relativistic pulse electron beam.