

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО (e, γ) - ОБЛУЧЕНИЯ НА ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ СТАЛИ AISI316

*И.М. Неклюдов, В.Н. Воеводин, Л.С. Ожигов, А.А. Пархоменко,
А.Г. Руденко, Б.А. Шиляев
ИНЦ ХФТИ, ИФТТМТ, г. Харьков, Украина*

Впервые изучено влияние высокоэнергетического (e, γ)-облучения ($E=225$ МэВ) на механические свойства и параметры деформационного упрочнения (скорость упрочнения, коэффициент прочности, показатель деформационного упрочнения) аустенитной нержавеющей стали AISI316. Установлена корреляция с результатами исследования влияния реакторного облучения в интервале доз $10^{-4} \dots 10^{-1}$ сна.

1. ВВЕДЕНИЕ

При выборе конструкционных материалов для изделий активной зоны ядерных реакторов основным критерием в большинстве случаев являются их механические свойства. Реакторное облучение металлов и сплавов в сочетании с температурой, механическими напряжениями и агрессивным влиянием среды стимулирует изменение физико-механических свойств материалов. В частности, с увеличением дозы облучения в широкой области температур испытаний происходит резкое снижение деформационной способности материалов.

Несмотря на многолетние исследования механизмов радиационного упрочнения и охрупчивания, вопрос о влиянии облучения на деформационное упрочнение и стадийность пластической деформации остается еще во многом открытым. Так отсутствует теория влияния облучения на изменение коэффициента и показателя деформационного упрочнения.

Исходя из этого, целью данной работы было провести анализ влияния высокоэнергетического (e, γ)-облучения, возможности которого для имитации реакторного облучения достаточно хорошо обоснованы [1], на параметры деформационного упрочнения одного из основных реакторных материалов – аустенитной стали AISI316. Аналогично реакторному, высокоэнергетическое (e, γ)-облучение уже при дозах $\leq 0,1$ сна приводит к образованию в материалах радиационных дефектов в виде мельчайших дислокационных петель и продуктов ядерных реакций (гелий и др.). При этом появляется возможность сравнить влияние нейтронного и высокоэнергетического (e, γ)-облучения на поведение основных параметров деформационного упрочнения материалов.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Пластины из стали AISI316, подвергались холодному деформированию на 50% до толщины 0,25 мм. Затем из листа вырезались образцы с размером рабочей части 3x10 мм. После этого образцы отжигались при температуре 1050°C в течение 30 мин.

Облучение проводилось на ускорителе ЛУ-2 ГэВ в ИНЦ ХФТИ высокоэнергетическими (e, γ)-пучками с энергией 225 МэВ при температуре $\sim 150 \pm 10^\circ\text{C}$. Интегральный флюенс облучения составлял 10^{22} и 10^{25} эл/м², что в соответствии с работой [1] эквивалентно дозе облучения 10^{-4} и 10^{-1} сна соответственно. Образцы были испытаны на растяжение со скоростью деформации $3,3 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹, на универсальной установке для механических испытаний. Все испытания проводились при комнатной температуре. На каждую точку испытывалось два образца.

Для описания кривых растяжения образцов использовалось эмпирическое уравнение:

$$\sigma = K \varepsilon^n, \quad (1)$$

где σ – истинное напряжение; ε – истинная деформация. Параметры n и K определяют, как показатель деформационного упрочнения и коэффициент прочности соответственно [2]. Следует отметить, что данная формула описывает только участок однородной деформации от конца площадки текучести до деформации, соответствующей началу образования в образце "шейки", т.е. нарушение закона постоянства объема.

Показатель деформационного упрочнения определялся следующим образом:

$$n = \Delta \lg \sigma / \Delta \lg \varepsilon \quad (2)$$

При этом, показатель деформационного упрочнения определяет форму кривой деформации и является структурно-чувствительной характеристикой материала. Начало образования шейки соответствует условию:

$$d\sigma / d\varepsilon = \sigma \quad (3)$$

Все вычисления коэффициента деформационного упрочнения (K) и показателя деформационного упрочнения (n) были произведены с учетом сглаживающих данных эксперимента, которые являются специальной операцией усреднения с помощью интерполяционных полиномов [3], обеспечивающих получение уточненных усредненных значений напряжения $\langle \sigma_i \rangle$ и деформации $\langle \varepsilon_i \rangle$ по заданным значениям напряжения σ_i и деформации ε_i и ряду близлежащих значений, полученных со случайной погрешностью.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис.1 представлены в истинных координатах кривые растяжения образцов из стали AISI316. Одна из этих кривых получена нами, а другая взята из работы [4] для стали того же состава и чистоты по примесям и углероду (HTUPS316). Хорошее совпадение кривых растяжения необлученных образцов позволяет нам провести сравнение влияния нейтронного и высокоэнергетического (e, γ)-облучений на деформационные параметры этой стали.

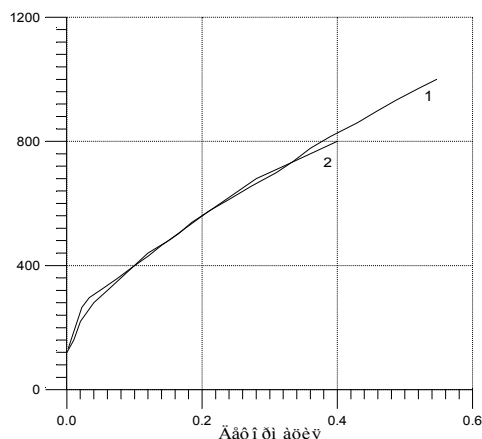


Рис.1. Зависимость истинной деформации от истинного напряжения для необлученных образцов: 1 – данные эксперимента; 2 – данные работы [4]

На рис. 2 приведены кривые растяжения необлученных и облученных до двух различных доз образцов.

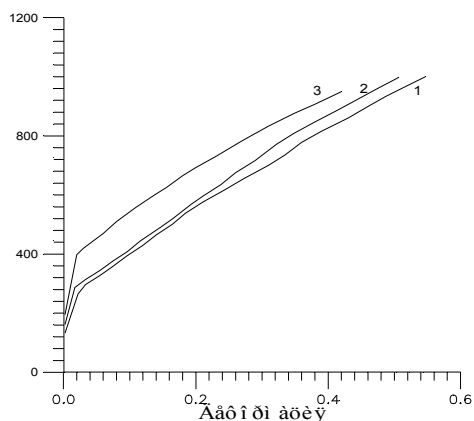


Рис.2. Зависимость истинной деформации от истинного напряжения для разных доз облучения: 1 – необлученные; 2 – облученные до доз 10^4 сна; 3 – облученные до доз 10^1 сна

Как видно из рисунка уже начиная с доз $\sim 10^4$ сна отмечается некоторое увеличение напряжения течения аустенитной стали при всех значениях пластической деформации.

Увеличение дозы облучения до 10^1 сна приводит к более значительному увеличению напряжения течения стали.

Данные, представленные на рис.3, показывают, что облучение высокоэнергетическими (e, γ)-пучками приводит к существенному радиационному упрочнению стали.

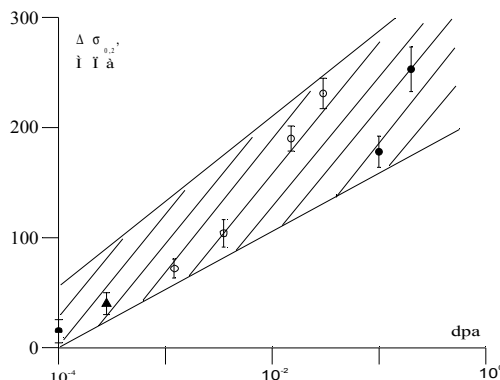


Рис.3. Дозовая зависимость радиационного упрочнения: ● – данные эксперимента, ▲ – данные работы [6], ○ – данные работы [7]

Сравнение результатов с результатами работ [5,6,7,8] показывает, что, с одной стороны, доза 10^4 сна является пороговой дозой для эффекта радиационного упрочнения как при реакторном, так и при высокоэнергетическом (e, γ) - облучениях, а с другой стороны, эта пороговая доза является одинаковой для целого ряда аустенитных нержавеющей сталей, облученных высокоэнергетическими (e, γ)-пучками. Это объясняется близостью спектра ПВА в случае облучения высокоэнергетическими (e, γ)-пучками и нейтронами [9].

На рис.4 представлены результаты обработки кривых растяжения в соответствии с уравнением (1) в координатах $\sigma(\sqrt{\epsilon})$.

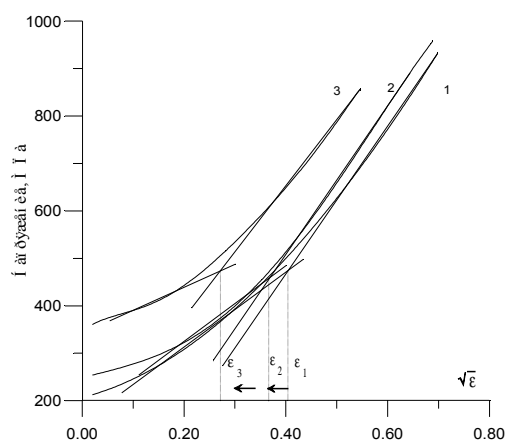


Рис.4. Зависимость истинной деформации от $\epsilon^{1/2}$: 1 – необлученные; 2 – облученные до доз 10^4 сна; 3 – облученные до доз 10^1 сна

Видно, что как для облученного, так и необлученного материалов эта зависимость начинает выполняться при некоторой степени деформации ϵ . При этом облучение практически не влияет на величину коэффициента К (т.е. изменение угла наклона).

на этой зависимости), но приводит к сдвигу этих зависимостей в область более низких деформаций $\epsilon_1 \rightarrow \epsilon_2 \rightarrow \epsilon_3$ (рис. 4), что можно рассматривать, как сдвиг деформации начала параболического деформационного упрочнения в область более низких степеней деформации. В свою очередь это означает, что облучение "ускоряет" смену механизмов деформационного упрочнения материалов.

Этот вывод соответствует представлениям предложенной синергетической концепции радиационного охрупчивания материалов [10], согласно которой роль облучения заключается в том, что оно ускоренным по деформации образом включает в пластическое течение более высокие структурные уровни пластической деформации.

На рис. 5 представлены значения показателя деформационного упрочнения при $T=20^\circ\text{C}$ в логарифмических координатах. Из сравнения показателей деформационного упрочнения для облученных и исходных образцов видно, что облучение приводит к снижению показателя n . Снижение показателя деформационного упрочнения отражает факт потери пластичности материала, учитывая то, что $n \equiv \epsilon_r$, где ϵ_r – равномерная деформация [2].

Как для исходного, так и для облученного материалов зависимость $n(\epsilon)$ можно разделить на два участка, существенно отличающихся углом наклона.

При низких степенях деформации как в исходном, так и в облученных материалах он существенно выше, чем при высоких. В свою очередь угол наклона $n(\epsilon)$ для облученных образцов выше, чем для исходных.

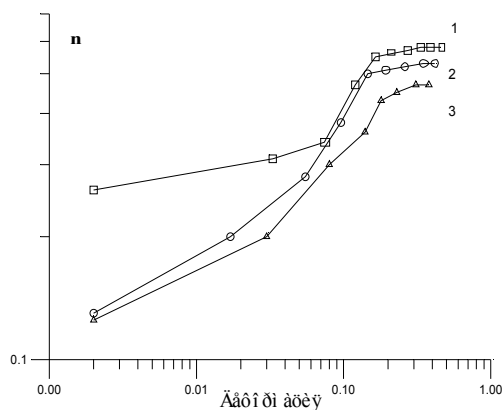


Рис.5. Зависимость показателя деформационного упрочнения (n) от деформации: 1 – необлученные; 2 – облученные до доз 10^4 сна; 3 – облученные до доз 10^1 сна

Начиная со степеней деформации 15% как в исходных, так и в облученных материалах этот параметр уже практически не зависит от величины пластической деформации. Говоря о влиянии облучения на величину n , следует отметить, что наиболее сильное снижение показателя деформационного упрочнения наблюдается также при малых степенях пластической деформации. При дальнейшем повы-

шении степени деформации наблюдается меньшее различие в значениях показателя деформационного упрочнения. Однако значения $n(\epsilon)$ для облученных образцов остаются ниже, чем для исходных, при всех степенях пластической деформации.

На рис. 6 представлены зависимости истинного напряжения (σ) и скорости деформационного упрочнения ($d\sigma/d\epsilon$) от истинной деформации (ϵ) (уравнение 3). Анализ зависимостей для исходных и облученных образцов, представленных на этом рисунке, показывает, что при облучении происходит сдвиг деформации начала развития пластической нестабильности в область меньших деформаций. При этом напряжение возникновения макропластической нестабильности практически не зависит от облучения. Этот факт будет предметом нашего обсуждения в последующих работах.

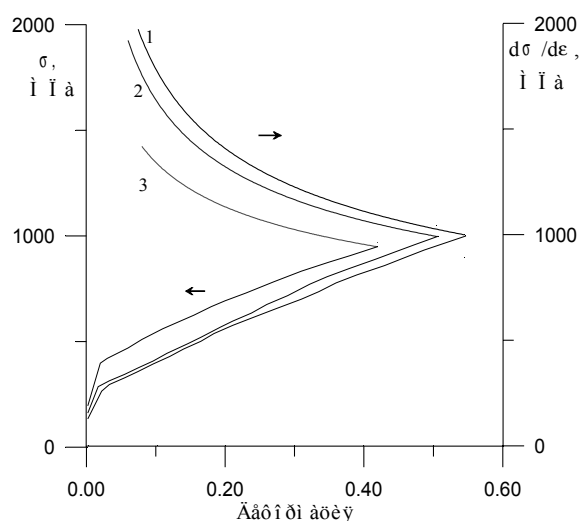


Рис.6. Зависимость истинного напряжения и скорости деформационного упрочнения от истинной деформации: 1 – необлученные; 2 – облученные до доз 10^4 сна; 3 – облученные до доз 10^1 сна

4. ВЫВОДЫ

1. Изучено влияние высокоэнергетического (e, γ)-облучения при дозах 10^4 и 10^1 сна на деформационное упрочнение стали AISI316 при комнатной температуре испытания.
2. Показано, что уже при дозе 10^4 сна отмечается изменение хода кривых растяжения, уменьшение показателя и скорости деформационного упрочнения материала. При этом облучение оказывает наибольшее влияние при малых степенях пластической деформации (меньше $\leq 15\%$).
3. Облучение приводит к сдвигу кривых растяжения в координатах $\sigma - \epsilon^{1/2}$ в область более низких значений пластической деформации.
4. Установлено, что облучение практически не оказывает влияния на коэффициент упрочнения K , но приводит к существенному сни-

жению показателя деформационного упрочнения п.

5. Установлен факт слабого влияния облучения на истинное напряжение возникновения шейки в облученной (e, γ)-пучками стали.
6. Полученные результаты хорошо коррелируют с данными, полученными на этой же стали, облученной нейтронами.

ЛИТЕРАТУРА

1. V.F. Zelenskij, I.M. Neklydov, L.S. Ozhigov, V.V. Gann, A.A. Parkhomenko, B.V. Borts and V.F. Stefanov // *J. Nucl. Mater.* 1993, v. 207, p.280.
2. *Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов* /Под ред. В.И. Трефилова. Киев: "Наукова думка", 1989 с.104.
3. В.П. Дьяконов. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. М. "Наука", 1987, с. 144.
4. T.S. Byun, K. Farrell, E.H. Lee, J.D. Hunn, L.K. Mansur // *J. Nucl. Mater.* 2001, v. 298, p. 269.
5. T.S. Byun, K. Farrell, E.H. Lee, L.K. Mansur, S.A. Maloy, M.R. James, W.R. Johnson // *J. Nucl. Mater.* 2002, v.303, p. 34.
6. L. Heinisch, S. Atkin, C. Martines. OWR/RTNS II Low esposute spectral effects experiment // *Damage Analyses*

and Fundamental Studies. DOE Quarterly Progress Report. May, 1986, p.76.

7. I.E. Powell et al. // *J. Nucl. Mater.* 1996, v.239, p.126.
8. И.М. Неклюдов, Л.С. Ожигов, А.А. Пархоменко и др. Влияние облучения пучками высокоэнергетических электронов и γ -квантов на механические свойства сталей X18H10T и 06X16 H15M3B. Препринт ХФТИ 88-53. Харьков: ХФТИ АН УССР, 1988.
9. В.Ф. Зеленский, И.М. Неклюдов. Радиационные повреждения в металлах и сплавах при облучении нейтронами, ионами и электронами // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1984, вып. 1(29), 2(30), с. 46–73.
10. А.А. Пархоменко, И.М. Неклюдов, В.В. Красильников и др. Синергетическая концепция радиационного охрупчивания // *Труды XV Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению (XV-ICPRP)*, Алушта, Крым, 2002, с.34.
11. I.E. Powell, M.I. Grossbeck, K.A. Shiba. Effect of low temperature neutron irradiated on deformation behavior of austenitic stainless steels // *In Proc.7 Int. conf. on Fusion reactor materials*, Obninsk, Russia, 1995, p.90.

ВПЛИВ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНОГО (e, γ)–ОПРОМІНЕННЯ НА ДЕФОРМАЦІЙНЕ ЗМІЦНЕННЯ АУСТЕНІТНОЇ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ AISI316

И.М. Неклюдов, В.Н. Воєводин, Л.С. Ожигов, А.А. Пархоменко, А.Г. Руденко, Б.А. Шильяев

Вперше досліджено вплив високоенергетичного (e, γ)–опромінення ($E=225$ MeB) на механічні властивості та параметри деформаційного зміцнення (швидкість зміцнення, коефіцієнт міцності, показник деформаційного зміцнення) аустенітної нержавіючої сталі AISI316. Встановлена кореляція з результатами досліджень впливу реакторного опромінення за доз $10^{-4} \dots 10^{-1}$ зміцнень на атом.

THE EFFECT OF HIGHENERGY (e, γ) –IRRADIATION ON STRAIN HARDENING AISI316 AUSTENITIC STAINLESS STEEL

I.M. Neklydov, L.S. Ozhigov, V.N. Voyevodin, A.A. Parkhomenko, A.G. Rudenko, B.A. Shilyaev

The influence of the highenergy (e, γ -irradiation ($E=225$ MeB) on the mechanical properties and deformation hardening parameters (hardening rate, strength coefficient, strength hardening exponent) austenitic stainless steel AISI316 has been studied at first. The correlation with reactor irradiation results in the doses $10^{-4} \dots 10^{-1}$ dpa is established.