

МЕХАНИКА

УДК 620.172.2:539.011:539.3

**РАДИАЦИОННОЕ СТАРЕНИЕ
И РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ****Р. А. Арутюнян*

Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

Многочисленные экспериментальные исследования показывают, что под воздействием высоких температур и радиационного облучения механические характеристики металлических сплавов претерпевают существенные изменения, вызванные, в частности, процессами распада твердого раствора и образованием вторичных фаз. В работе эти процессы описываются в рамках механики материалов с помощью параметров поврежденности с учетом первого закона термодинамики. Сформулированы уравнения теории ползучести и критерий длительной прочности. Выполнен сравнительный анализ теоретических и опытных кривых ползучести. По данным оценочным расчетам и согласно опытам в случае радиационного воздействия наблюдается значительное снижение длительной прочности материала. Библиогр. 16 назв. Ил. 2.

Ключевые слова: Металлические сплавы, радиационное старение и разрушение, кривые ползучести, параметр поврежденности, первый закон термодинамики, критерий длительной прочности.

Введение. Под воздействием различных видов ядерных излучений основные практически важные свойства металлических сталей и сплавов претерпевают заметные изменения: ускоряются процессы ползучести, старения, разрыхления и охрупчивания и, как следствие, уменьшение времени до разрушения в десятки и сотни раз [1–4]. В работе эти процессы описываются в рамках механики материалов с помощью параметров поврежденности с учетом первого закона термодинамики. Сформулированы уравнения теории ползучести и критерий длительной прочности. Даны сравнения с результатами известных экспериментальных работ.

Большинство металлических сплавов, используемых в современной технике, являются метастабильными твердыми растворами, склонными к распаду и образованию насыщенного раствора и стабильных частиц выделений. Как показывают опыты, соответствующие изменения претерпевают физико-механические свойства рассматриваемых материалов [5]. Распад твердого раствора существенно ускоряется при воздействии различных физических полей: силовых, радиационных, тепловых и др. В совокупности эти процессы известны как эффекты старения. В частности, деформационное старение определяется как зависящее от времени изменение свойств матери-

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-08-00763).

алов в процессе деформации и после нее. В мировой научной литературе накоплены многочисленные исследования по влиянию процессов старения на изменения скорости ползучести, которые указывают, что процессы деформационного и радиационного старения способствуют разупрочнению материала и повышению скорости ползучести. Эффекты разупрочнения при ползучести «чистых» металлов удается объяснить физической нестабильностью материала, в частности, ускорением процесса отрыва в окрестностях зернограничных пор [6]. В металлических сплавах существенное влияние на скорость ползучести на всех стадиях оказывают также процессы распада твердого раствора и образования вторичных фаз. Эти изменения фазового состава вначале упрочняют материал и снижают скорость ползучести, затем происходит коагуляция частиц второй фазы, способствующая разупрочнению материала, увеличению скорости ползучести и ускорению процесса разрушения [7, 8].

Влияние избыточной концентрации различных дефектов, внесенных закалкой и пластической деформацией, на распад твердых растворов исследовано подробно [5]. В то же время, как указывается многими исследователями [2, 3], более сложная проблема радиационного распада изучена довольно слабо. Эта проблема связана с внедрением в материал различных радиационных повреждений и их влиянием на кинетику распада твердых растворов с учетом стадий отжига дефектов и соответственно изменение механических характеристик материалов. Как показывают опыты, эти изменения могут быть довольно сложными. В процессе облучения возникают простые и сложные комплексы дефектов, в том числе вакансии и междоузельные или внедренные атомы. При этом часть дефектов способна аннигилировать на противоположных по типу дефектах, сливаясь с дислокациями или выходя на поверхность. Другая часть дефектов может объединяться в скопления, образуя поры внутри твердого тела. В свою очередь внедренные атомы могут также объединиться и образовать участки лишней атомной плоскости. Эти процессы способствуют ускорению распада твердого раствора и соответственно изменению его механических свойств.

Для учета старения в уравнениях теории ползучести рассмотрим переменную $\beta = (c_0 - c)/(c_0 - c_\infty)$, характеризующую изменение объемной доли упрочняющих фаз [7]. Здесь c_0 , c , c_∞ — начальная, текущая и конечная концентрации легирующего элемента, ведущего превращение.

Скорость изменения β -фазы зададим следующим уравнением:

$$\frac{d\beta}{dt} = (1 - \beta)f(\sigma, T, \varphi, t), \quad (1)$$

где T — температура, σ — напряжение, φ — доза облучения, t — время.

При анализе экспериментальных данных для стареющих сталей и сплавов используют обычно степенную аппроксимацию $f(t) = k_0 t^n$ (k_0 , n — постоянные) [5]. В этом случае решение уравнения (1) при начальном условии $t = 0$, $\beta = 0$ имеет вид

$$\beta = 1 - e^{-k_1 t^{n+1}}, \quad (2)$$

где $k_1 = k_0(n + 1)$.

Учитывая отмеченную зависимость скорости ползучести $\dot{\epsilon}$ от процесса распада и рассматривая, в первом приближении, кинетическое уравнение первого порядка, т.е. считая $n = 0$, примем, следуя концепции поврежденности [9, 10], следующее уравнение для скорости ползучести $\dot{\epsilon}$:

$$\dot{\epsilon} = B e^\phi e^{a\sigma} (1 - \beta)^{-m}, \quad (3)$$

где a , m — постоянные, $B = B(T)$, $\phi = \phi(\varphi)$ — некоторые функции от температуры и дозы облучения.

При условии $\beta = 0$ уравнение (3) совпадает с законом ползучести для среды стабильного состава. С увеличением β скорость ползучести возрастает и, когда β стремится к 1, скорость ползучести стремится к бесконечности. Такое положение соответствует экспериментальным данным изменения скорости ползучести на большом временном интервале кривой ползучести и характеризуется разупрочняющим влиянием стадии коагуляции частиц второй фазы.

Учитывая (2) (при $n = 0$), уравнение (3) запишем в виде

$$\dot{\varepsilon} = B e^{(a\sigma + \phi)} e^{bt}, \quad (4)$$

где $b = mk_0$.

При постоянных напряжении, температуре и коэффициентах решение уравнения (4) с учетом начальных условий $t = 0$, $\varepsilon = 0$ имеет вид

$$\varepsilon = \frac{B e^{(a\sigma + \phi)}}{b} [e^{bt} - 1]. \quad (5)$$

Для сравнения с результатами опытов воспользуемся данными работы [6] по ползучести сплава 03X20H45M4БРЦ при температуре 650°C. В этой работе были получены экспериментальные кривые ползучести при различных уровнях напряжений: 250, 220, 200, 180, 150 МПа. По этим кривым нами были конкретизированы параметры уравнения (5): $B = 9,203 \cdot 10^{-9} [\text{ч}]^{-1}$, $a = 0,041 [\text{МПа}]^{-1}$, $b = 3,4 \cdot 10^{-4} [\text{ч}]^{-1}$.

На рис. 1 сплошной линией показана теоретическая кривая ползучести при значении $\sigma = 180$ МПа (без учета радиации). Крестиками на этой кривой отмечены выборочные точки соответствующей экспериментальной кривой ползучести. Штриховой линией показана теоретическая кривая ползучести с учетом радиации согласно формуле (5). При расчетах по этой формуле параметры конкретизировались по опытным кривым ползучести, полученным при напряжениях 250, 180 МПа и температуре 650°C после облучения дозой $1,1 \cdot 10^{21} [\text{н}][\text{см}]^{-2}$. Для $\phi = c_1 \varphi$ (c_1 — постоянная) найдено $c_1 = 2,2 \cdot 10^{-21} [\text{н}]^{-1}[\text{см}]^2$. Выборочные экспериментальные точки соответствуют кривым ползучести для образца после облучения дозой $1,1 \cdot 10^{21} [\text{н}][\text{см}]^{-2}$. Согласно представленным данным имеется хорошее согласие между теоретическими и экспериментальными кривыми ползучести.

С учетом полученных соотношений и первого закона термодинамики можно сформулировать критерий длительной высокотемпературной прочности. В приложении к рассматриваемой проблеме деформирования и разрушения металлических материалов в условиях радиационной ползучести первый закон термодинамики может быть сформулирован следующим образом. При переходе образца из начального состояния (начальное нагружение) в конечное состояние (разрушение образца) малое приращение внутренней энергии системы du равно сумме приращений совершенной над системой работы δw (работа деформации), отведенного от системы тепла δq и приращения радиационной энергии δR :

$$du = \delta w - \delta q + \delta R, \quad (6)$$

где $\delta w = \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$ ($d\varepsilon_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij} dt$) — плотность работы сил, действующих на элемент среды, σ_{ij} — компоненты тензора напряжений, $d\varepsilon_{ij}$ — компоненты тензора приращения

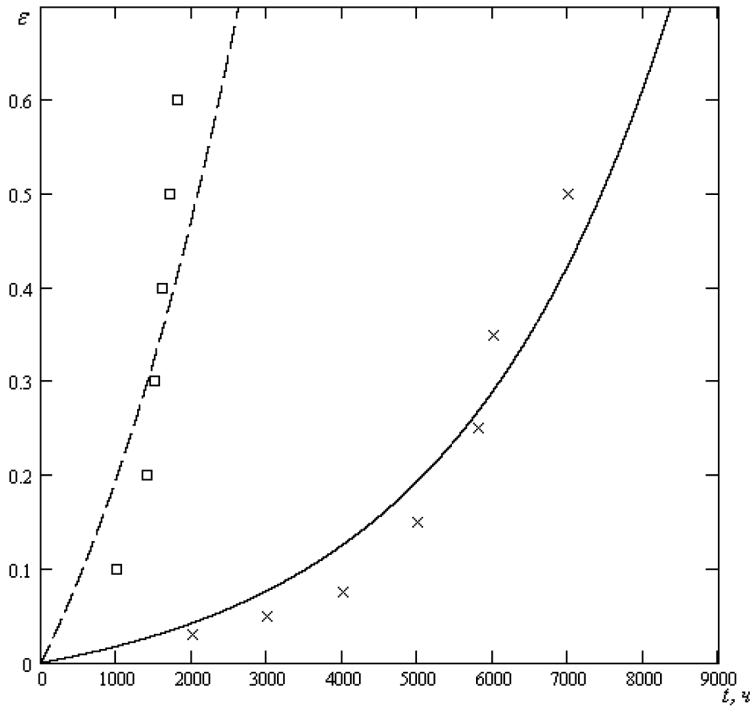


Рис. 1. Теоретические кривые ползучести (сплошная линия — без радиации, штриховая линия — после облучения дозой $1,1 \cdot 10^{21} [\text{н}][\text{см}]^{-2}$ сплава ОЗХ20Н45М4БРЦ при 650°C , $\sigma = 180 \text{ МПа}$. Точки — данные работы [6].

деформаций. В законе (6) все величины отнесены к объему элемента среды, т. е. являются удельными величинами. При этом элементарные приращения δw , δq и δR не являются полными дифференциалами. Однако суммарно они составляют величину приращения внутренней энергии, которая является функцией состояния.

Проинтегрируем соотношение (6) от начального состояния (соответствующие величины отмечены индексом 0) до момента разрушения (соответствующие величины отмечены индексом *). Тогда из (6) имеем

$$\Delta u_* = w_* - \Delta q_* + \Delta R_*, \quad (7)$$

где

$$\Delta u_* = \int_{u_0}^{u_*} du = u_* - u_0, \quad w_* = \int_0^{w_*} \delta w, \quad \Delta q_* = \int_{q_0}^{q_*} \delta q, \quad \Delta R_* = \int_{R_0}^{R_*} \delta R. \quad (8)$$

Далее введем обозначения $\Delta q_* = w_{*1}$, $\Delta u_* = w_{*2}$, $\Delta R_* = w_{*3}$; тогда закон сохранения энергии (8) запишем как $w_* + w_{*3} = w_{*1} + w_{*2}$, где w_* — полная работа деформации, состоящая из тепловой (w_{*1}), радиационной (w_{*3}) и скрытой (w_{*2}) [11, 12] составляющих энергии.

В случае простого растяжения $\varepsilon_{ij} = \varepsilon$, $\sigma_{ij} = \sigma$, где $\sigma = \text{const}$, энергия деформации может быть рассчитана по формуле $w_* = \sigma \varepsilon_*$, из которой следует

$$\varepsilon_* = \frac{w_*}{\sigma} = \frac{w_{*1} + w_{*2} - w_{*3}}{\sigma}. \quad (9)$$

Сравнивая деформации ползучести $\varepsilon = \varepsilon_*$ в момент разрушения $t = t_p$ в соотношениях (5), (9), получим соответствующий критерий длительной прочности:

$$t_p = \frac{1}{b} \ln \left[1 + \frac{b(w_{*1} + w_{*2} - w_{*3})}{B\sigma e^{(a\sigma + \phi)}} \right]. \quad (10)$$

Пренебрегая в (10) тепловой и радиационной составляющими энергии, получим упрощенный вариант критерия длительной прочности, рассмотренный ранее в работах [13, 14]:

$$t_p = \frac{1}{b} \ln \left[1 + \frac{bw_{*2}}{B\sigma e^{a\sigma}} \right]. \quad (11)$$

Как показывают расчеты, критерий (10) описывает хорошо качественную картину процессов длительного разрушения металлических сплавов под воздействием и без воздействия радиационного облучения. Соответствующие кривые длительной прочности показаны на рис. 2: кривая 1 построена по критерию (10), кривая 2 — по критерию прочности без учета радиационного воздействия.

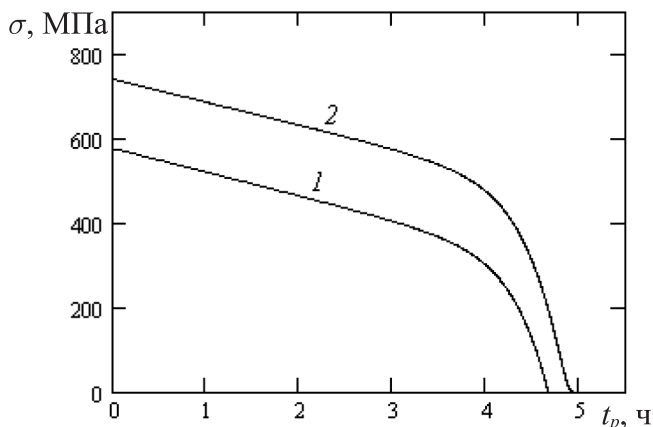


Рис. 2. Кривые длительной прочности с учетом (1) и без учета радиации (2).

При построении кривых 1 и 2 на рис. 2 были использованы следующие величины коэффициентов: $a = 0,041[\text{МПа}]^{-1}$, $B = 9,203 \cdot 10^{-9}[\text{ч}]^{-1}$, $b = 3,4 \cdot 10^{-4}[\text{ч}]^{-1}$, $c = 4 \cdot 10^{-22}[\text{н}]^{-1}[\text{см}]^2$, $\phi = 5 \cdot 10^{22}[\text{н}][\text{см}]^{-2}$, $w_{*2} = 10^8[\text{Дж}][\text{м}]^{-3}$, $w_{*3} = 8 \cdot 10^{10}[\text{Дж}][\text{м}]^{-3}$ согласно опытным данным из различных публикаций [15, 16].

По данным оценочным расчетам и согласно опытам [1–4] в случае радиационного воздействия наблюдается значительное снижение длительной прочности материала.

Литература

1. Ибрагимов Ш. Ш., Кирсанов В. В., Пятилетов Ю. С. Радиационные повреждения металлов и сплавов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 240 с.
2. Иванов Л. И., Платов Ю. М. Радиационная физика металлов и ее приложения. М.: Интерконтакт; Наука, 2002. 200 с.
3. Паршин А. М., Тихонов А. Н., Бондаренко Г. Г., Кириллов Н. Б. Радиационная повреждаемость и свойства сплавов. СПб.: Политехника, 1995. 301 с.

4. Горьнин И. В., Паршин А. М., Ибрагимов Ш. Ш., Ярошевич В. Д., Кожевников О. А., Айтхожин Э. С., Науменко Г. А., Андреев В. В., Лапин А. Н., Куцаинов С. К. Особенности ползучести высоконикелевого сплава в условиях нейтронного облучения // Радиационные дефекты в металлических кристаллах. (Материалы Всесоюзного совещания, Алма-Ата, 14–16 июня 1977). Алма-Ата: Изд-во «Наука» Казах. ССР. 1978. С. 153–158.
5. *Старение сплавов* / под редакцией М. И. Захаровой. Металлургиздат, 1962. 493 с.
6. Розенберг В. М. Основы жаропрочности металлических материалов. М.: Металлургия, 1973. 325 с.
7. Арутюнян Р. А. Проблема деформационного старения и длительного разрушения в механике материалов. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2004. 253 с.
8. Robert A. Arutyunyan. Mechanics of radiation damage and embrittlement of metallic materials // Proceedings of XXXV Summer School-Conference “Advanced problems in mechanics”. 20–28 June. 2007. St.-Petersburg (Repino). St.-Petersburg: IPME RAS, 2007. P. 16–20.
9. Качанов Л. М. О времени разрушения в условиях ползучести // Известия АН СССР. Отд. тех. наук. 1958. № 8. С. 26–31.
10. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций М.: Наука, 1966. 752 с.
11. Taylor G. I., Quinney H. The latent energy remaining in a metal after cold working // London. Proc. Roy. Soc. 1934. Ser. A. Vol. 143. P. 307–326.
12. Большанина М. А., Панин В. Е. Скрытая энергия деформации // Исследование по физике твердого тела. Изд-во АН СССР. 1957. С. 193–234.
13. Robert A. Arutyunyan. Energy consumption for creep fracture of metallic materials // Acta Mechanica Sinica. 2008. Vol. 24, N 4. P. 469–472.
14. Арутюнян Р. А., Якимова К. С. Энергетические затраты при разрушении металлических материалов в условиях высокотемпературной ползучести // Морские интеллектуальные технологии. 2009. № 3(5). С. 3–7.
15. Максимкин О. П., Гусев М. Н. Изменения напряжений течения и латентной энергии при деформации нержавеющей стали 12Х18Н10Т, облученной нейтронами // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 3. С. 1–7.
16. Гусев М. Н., Токтогулова Д. А. Диссипативные процессы при пластической деформации армо-железа и стали 12Х18Н10Т, облученных нейтронами до $1,3 \cdot 10^{20} [\text{н}][\text{см}]^{-2}$ // Вестн. удмуртск. ун-та. Физика. 2007. № 4. С. 113–121.

Статья поступила в редакцию 24 октября 2013 г.

Сведения об авторах

Арутюнян Роберт Ашотович — доктор физико-математических наук, профессор;
Robert.Arutyunyan@paloma.spbu.ru

RADIATION AGING AND FRACTURE OF METALLIC ALLOYS

Robert A. Arutyunyan

St.Petersburg State University, Universitetskaya nab., 7/9, St.Petersburg, 199034, Russian Federation;
Robert.Arutyunyan@paloma.spbu.ru

Under the attack of irradiation on metallic alloys the following effects are observed: low temperature and high temperature creep and fracture, irradiation aging and embrittlement. According to experiments the time to fracture of metallic alloys decreases many times depending on temperature, irradiation dose and aging. These effects are investigated integrally in the framework of the mechanic of materials methods. To formulate the creep fracture law the energy conservation law is applied. The theoretical curves of creep and creep fracture for different values of irradiation dose are constructed and compared with the corresponding experimental results. Refs 16. Figs 2.

Keywords: metallic alloys, radiation aging and fracture, creep curves, damage parameter, energy conservation law, creep fracture criterion.