A.V. Gorokh

CHANGE OF THE ATOMS (IONS) IONIZATION POTENTIALS IN THE NATURAL ROW OF CHEMICAL ELEMENTS. REGULARITIES AND CONSEQUENCES

In the work on the basis of established regularities of the change of isoelectronic atomic (ions) ionization potentials related to the nucleus charge the sequence showing the electron structure of atoms of the natural row of chemical elements was considered and the genetic interpretation of its positions in the periodical system was given.

Fig. 1. Dependence of the isoelectronic atomic (ions) ionization potentials $\sqrt{E_i}$ on nucleus charge Z and building scheme of the electron shells of atoms for the natural row of chemical elements

Fig. 2. Periodical system of the chemical elements with account of energetic regular succession of electron structures of the atoms

УДК 669.15 24:539.213

О.Н. Белошов

НЕУПРУГАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ СТЕКЛЕ, ДОСТИГШЕМ РАВНОВЕСИЯ

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины
340114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72

Статья поступила в редакцию 27 октября 1998 года

Экспериментально исследован процесс неупругой ползучести в условиях изотермического отжига упругих напряжений в аморфном сплаве $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$. Показано, что неупругая ползучесть приводит к замедлению скорости сброса напряжений. Получены численные соотношения между упругим и сдвиговым модулями, между упругим модулем и модулем, связанным с неупругой ползучестью, а также определены характерные времена процесса.

Явление неупругой ползучести в кристаллических материалах согласно диаграмме ползучести наблюдается в области значений $\sigma/\mu \leq 10^{-5}$ [1], где σ – упругие напряжения, μ – модуль сдвига. В работе [2] авторами высказывалось предположение о проявлении неупругой ползучести в аморфном сплаве при изменении величины нагрузки в экспериментах по растяжению образца в изотермических условиях. В [3] была предложена модель феноменологического описания процесса релаксации упругих напряжений с учетом неупругой ползучести в аморфном сплаве $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$ в условиях изотермического отжига. Принципиальная трудность в расчете теоретической зависимости в упомянутой работе заключалась в том, что в общем случае в уравнение, описывающее процесс релаксации напряжений, входят вязкостное время и время неупругой ползучести, которые являются неизвестными функциями времени. В настоящей публикации эта модель использована для описания релаксации напряжений в том случае, когда вязкостное время достигает своего постоянного значения и остается неизменным в процессе дальнейшего отжига.

Эксперимент

Образцы для исследований вырезались из ленты аморфного сплава $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$, полученной методом спиннингования. Их длина составляла 15 мм при ширине ленты в 2 мм и толщине 30 мкм. Такой образец закручивался вокруг длинной оси на угол ~ 10°, в нем возникали упругие напряжения, которые создавали крутящий момент. После деформации образец подвергался отжигу при постоянной температуре, равной 613 K, при этом непрерывно измерялась величина крутящего момента, время отжига и температура образца. Нагрев осуществлялся в вакууме в печи оригинальной конструкции. Градиент температур по длине образца не превышал 2 K, точность поддержания температуры составляла ± 1 K, время прогрева образца до температуры отжига равнялось 10 с.

По истечении некоторого времени в результате отжига упругие напряжения снижались до нуля, образец вновь деформировался *in situ* и измерения продолжались. В данном эксперименте было произведено 8 таких актов деформация–полный отжиг. Подробно конструкция установки описана в работе [4].

Анализ экспериментальных данных и их обсуждение

В работе [5] показано, что кривая зависимости вязкостного времени τ аморфного сплава $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$ от времени отжига вначале растет, а затем достигает насыщения. Если сброс напряжений осуществляется только по вязкостному механизму, а вязкостное время достигает постоянного значения, то процесс релаксации напряжений описывается уравнением [5]:

$$d\sigma/dt = -\mathrm{sh}(c\sigma)/c\tau_e, \qquad (1)$$

где σ – напряжения, $d\sigma/dt$ – скорость сброса напряжения, c – подгоночный параметр, τ_e – вязкостное время. Разделяя переменные и интегрируя, запишем следующее выражение: $\ln(\mathrm{th}(\sigma c/2)) = -1/\tau_e + \mathrm{const}$, использованное нами для определения значения вязкостного времени $\tau_e = 5393c$ (величина параметра c = 0,00153 получена методом, описанным в [5]). Решение уравнения (1) относительно σ может быть записано в виде

$$\sigma(t) = c^{-1}\ln\{[1 + f(t)]/[1 - f(t)]\},$$

где $f(t) = \exp(-t/\tau_e)\mathrm{cth}(c\sigma_0/2)$, σ_0 – начальные напряжения.

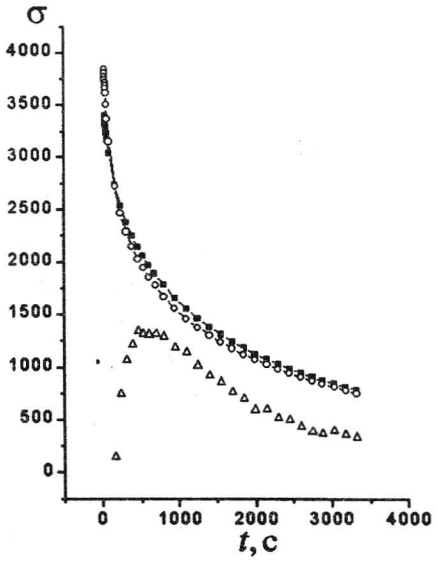

Рис. 1. Экспериментальная (■) и расчетная (○) кривые сброса напряжений при постоянном вязкостном времени $\tau_e = 5393c$. Треугольниками показана разность между абсциссами этих кривых

На рис. 1 представлены расчетная и экспериментальная кривые сброса напряжений для шестого акта деформации. Как видно из рисунка, кривые почти совпадают. В начале отжига разность близка к нулю, затем нарастает до своего максимального значения, а по истечении некоторого времени повторяет ход основной кривой. Такой характер зависимости разностной кривой свидетельствует о существовании другого, отличного от вязкостного, механизма изменения величины напряжений, причем с меньшим характерным временем. Предположим, что таким механизмом является неупругая ползучесть. Для проверки гипотезы используем упомянутую выше модель, где считается, что изменение напряжений

во времени осуществляется по вязкостному механизму и механизму неупругой ползучести одновременно [3]. При этом общая деформация образца $\varepsilon = \varepsilon_l + \varepsilon_\eta + \varepsilon_r$ (где ε_l, ε_η – соответственно упругая и вязкая деформации, ε_r – деформация неупругой ползучести) в процессе отжига остается постоянной. Кроме того, будем полагать, что выполняются следующие соотношения: для упругих напряжений справедлив закон Гука – $\varepsilon_l E = \sigma$, для скорости изменения деформации при вязком течении – $\mathrm{d}\varepsilon_\eta/\mathrm{d}t = \sigma/\tau_\eta$, для скорости изменения деформации в случае неупругой ползучести – $\mathrm{d}\varepsilon_r/\mathrm{d}t = -(\varepsilon_r - \alpha\sigma)/\gamma$. Значения всех модулей в процессе отжига также считаются постоянными.

Дифференцируя по времени выражение для полной деформации и используя приведенные соотношения, запишем следующую систему уравнений:

$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}t} = +\frac{E\,\mathrm{sh}(c\sigma)}{\mu\tau_e c} - \frac{\varepsilon_r - \alpha\sigma}{\gamma} = 0,$$
$$\frac{\mathrm{d}\varepsilon_r}{\mathrm{d}t} = \frac{\varepsilon_r - \alpha\sigma}{\gamma}, \qquad (2)$$

где γ – время неупругой ползучести, E – модуль упругости, μ – модуль сдвига, α^{-1} – модуль, соответствующий процессу неупругой ползучести.

В нашем случае материал достиг состояния, при котором вязкостное время постоянно. Допустим, что ползучесть также протекает при постоянном γ.

Анализ разностной кривой на рис. 1 показывает, что в конце отжига работает только вязкостный механизм сброса напряжений, поэтому в первом уравнении системы (2) два первых слагаемых можно оставить, а третьим – пренебречь. Построив зависимость $\mathrm{d}\sigma/\mathrm{d}t$ от $\mathrm{sh}(c\sigma)/\tau_e c$, определяем величину отношения E/μ = 0,9. Значение отношения модуля упругости к модулю сдвига, меньшее 1, свидетельствует о необычном состоянии материала. Далее, рассчитав по экспериментальным данным сумму первых двух слагаемых в первом уравнении системы (2), согласно второму уравнению системы находим временную зависимость скорости деформации неупругой ползучести, умноженной на модуль упругости. Разделяя переменные и интегрируя второе уравнение, получаем

$$E\,\varepsilon_r = \alpha\,\sigma_0 E\left(\sigma/\sigma_0 - \exp\left(-t/\gamma\right)\right). \qquad (3)$$

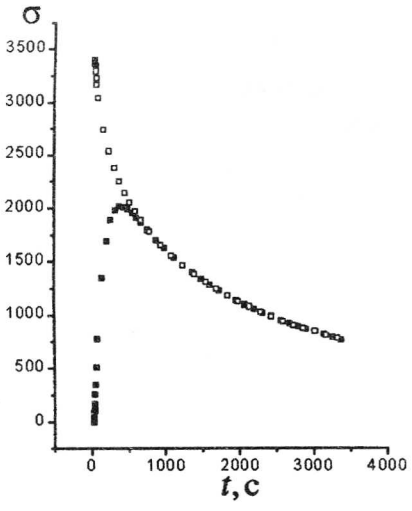

Рис. 2. Экспериментальная кривая релаксации упругих напряжений (□) и расчетная кривая роста напряжений (■), обусловленного неупругой ползучестью

Полагая в начале отжига в уравнении (3) отношение $\sigma/\sigma_0 = 1$, определяем значение γ = = 133c. Поделив обе части уравнения (3) на αE, получаем выражение для расчета временной зависимости возникновения напряжений в образце под действием неупругой ползучести $\alpha^{-1}\varepsilon_r = \sigma - \sigma_0 \exp\left(-t/\gamma\right)$. На рис. 2 изображена эта зависимость вместе с экспериментальной кривой сброса напряжений. Видно, сколь существен вклад неупругой ползучести в процессе релаксации на начальном этапе.

Далее с помощью уравнения (3) определяем значение отношения модуля упругости к модулю, соответствующему процессу неупругой ползучести αE = 0,058. Оказалось, что в процессе релаксации напряжений в исследуемом материале

модуль, соответствующий неупругой ползучести, значительно превышает как сдвиговый модуль, так и модуль упругости.

В заключение подведем некоторые итоги работы. Процесс релаксации упругих напряжений в аморфном сплаве $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$ сопровождается явлением неупругой ползучести, что выражается в существенном замедлении спада наведенных напряжений. В данном материале, достигшем состояния, при котором вязкостное время постоянно, модуль упругости является наименьшим по сравнению с модулем сдвига и модулем, соответствующим процессу неупругой ползучести.

1. *Физическое* металловедение, Р. Кан (ред.), Мир, Москва (1968).
2. *A.Van den Beuke, E.Huizer, A.L.Muldev, S.Van der Zwaag*, Acta Metall. **34**, 483 (1986).
3. *О.Н. Белошов, Э.П. Фельдман, Е.В. Володарская*, Изв. РАН. Сер. физ. **60**, № 9, 169 (1996).
4. *В.П. Набережных, О.Н. Белошов*, ПТЭ № 5, 234 (1989).
5. *О.Н. Белошов, Е.В. Володарская*, МФиНТ **19**, 27 (1997).

O.N. Beloshov

NON-ELASTIC CREEP OF THE METALLIC GLASS IN EQUILIBRIUM

The non-elastic creep process is investigated experimentally under the isothermal annealing of elastic stress in amorphous alloy FeNiPB . It is shown that the non-elastic creep causes some delay of stress relaxation velocity. Numerical relations of elastic modulus with the shear and creep moduli are obtained. The characteristic time of the process is also estimated.

Fig. 1. Experimental (■) and calculated (○) curves of stress relaxation under the constant viscosity time τ_e. The triangles show the difference between the abscissae of these curves

Fig. 2. Experimental curve of elastic stress relaxation (□) and calculated curve of the stress growth associated with the non-elastic creep (■)