

05

## Изменения напряжений течения и латентной энергии при деформации нержавеющей стали 12Х18Н10Т, облученной нейтронами

© О.П. Максимкин, М.Н. Гусев

Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Республика Казахстан

Поступило в Редакцию 9 августа 2002 г.

Изучены закономерности изменения величин напряжения течения  $\sigma$  и латентной энергии  $E_s$  при пластической деформации образцов стали 12Х18Н10Т, облученных и необлученных нейтронами  $5 \cdot 10^{22}$  н/м<sup>2</sup> ( $E > 0.1$  MeV). Показано, что на кривой „ $E_s - \sigma$ “ может быть выделено несколько участков, в пределах 1-го из которых взаимосвязь между  $E_s$  и  $\sigma$  описывается уравнением вида  $E_s \sim E_0 + k \cdot \sigma^2$ , где  $E_0$  и  $k$  — коэффициенты. Установлено, что облучение нейтронами смещает кривые „ $E_s - \sigma$ “ в сторону меньших значений  $E_s$ .

**Введение.** Дефектная структура, образующаяся и эволюционирующая в процессе облучения и/или деформации металлических кристаллов, является „носителем“ латентной (скрытой) энергии  $E_s$ . С величиной  $E_s$  связывают изменения многих важнейших свойств (физических, механических, химических) металлов и сплавов, а также особенности протекающих в них структурных и фазовых превращений [1]. Полагают, в частности, что способность материала накапливать и рассеивать подводимую извне механическую энергию определяет степень и закономерности его упрочнения при деформации [2]. В то же время, поскольку дефектная структура влияет на уровень внутренних напряжений в кристалле, для каждого момента пластической деформации  $E_s$

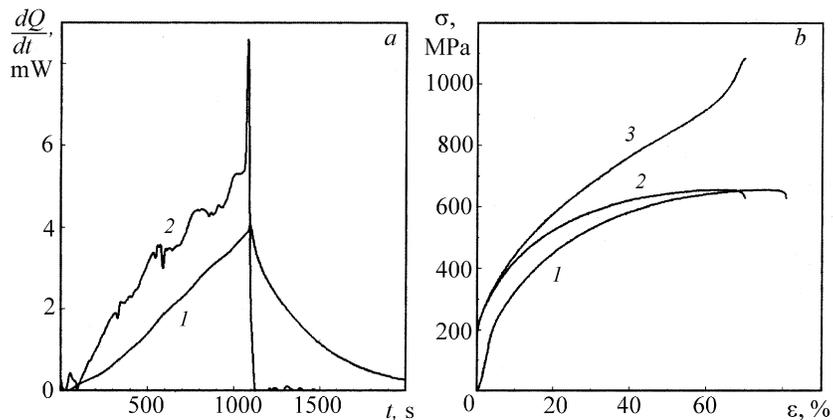
должна быть связана с величиной напряжения течения  $\sigma$ . Этот вопрос рассмотрен, например в работе [3], где показано, что  $E_s \sim \sigma^2$ , однако он еще далек от своего окончательного решения для реальных материалов и особенно для поликристаллов, содержащих дефекты радиационного происхождения.

**Методика проведения эксперимента.** С целью изучения процессов накопления и рассеяния энергии при пластической деформации необлученных и облученных металлов и сплавов нами была сконструирована и отлажена установка, совмещающая калориметр Кальве и микроразрывное устройство [4], позволяющая синхронно регистрировать диаграмму растяжения в координатах „усиление ( $F$ )–удлинение ( $\Delta l$ )“, а также термограмму „интенсивность тепловыделения ( $dQ/dt$ )–время ( $t$ )“. Ранее на этой установке был проведен ряд экспериментов по изучению рассеяния и накопления энергии в процессе растяжения железа, ниобия [5] и аустенитной стали 12X18H10T [6].

В настоящей работе исследовали нержавеющую сталь 12X18H10T (размеры плоских образцов для механических испытаний  $10 \times 3.5 \times 0.3$  mm, аустенизация 1323 K, 30 min в вакууме, охлаждение водой) в необлученном состоянии, а также после облучения нейтронами флюенсом  $5 \cdot 10^{22}$  n/m<sup>2</sup> ( $E > 0.1$  MeV, температура облучения не выше 330 K). Необлученные и облученные нейтронами образцы подвергали одноосному растяжению со скоростью  $8.3 \cdot 10^{-4}$  s<sup>-1</sup> в интервале температур 293 ÷ 473 K. По экспериментальным данным вычисляли работу деформации  $A = \int F dl$ , выделившееся тепло  $Q = \int dQ/dt \cdot dt$  и интегральную величину латентной энергии  $E_s = A - Q$ . Применяя методику восстановления термограмм, подробно описанную в [7], вычисляли деформационные зависимости энергетических характеристик  $A$ ,  $Q$ ,  $E_s$ , при этом ошибка в определении величины  $F_s$  не превышала 15%. Полученные из экспериментов данные использовали для построения зависимости „ $E_s - \sigma_1$ “, при этом с целью определения значений истинных напряжений течения  $\sigma_1 = F_1 S_1$  применяли полученное нами эмпирическое выражение, связывающее текущее значение площади сечения  $S_i$  и соответствующее ему относительное удлинение  $\delta_i$  образца:

$$S_i = S_0 - A \cdot \delta_1 - B \cdot \exp\left(\frac{\delta_0 - \delta_i}{\delta}\right),$$

где  $\delta_0$  и  $\delta$  — равномерная и полная деформация соответственно,  $S_0$  — значение первоначального сечения образца,  $A$  и  $B$  — постоянные.



**Рис. 1.** Типичные экспериментальные и рассчитанные кривые для необлученной стали 12X18H10T, деформированной при 293 К: *a* — первичная (1) и восстановленная (2) термограммы; *b* — диаграммы растяжения в координатах: „нагрузка—полная деформация“ (1), „условное напряжение—остаточная деформация“ (2) и „истинное напряжение  $\sigma_1$ —остаточная деформация  $\epsilon$ “ (3).

Отклонение величины  $\sigma_1$  (далее —  $\sigma$ ), рассчитанной с помощью приведенной выше формулы, от значения, полученного в контрольном эксперименте, где непосредственно измеряли текущие величины ширины и толщины деформируемого образца, не превышало 5% в области равномерной деформации.

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** На рис. 1 показаны первичная термограмма (искаженная из-за инерционности калориметра), регистрируемая в ходе калориметрического эксперимента, восстановленная в соответствии с [7] („истинная“) термограмма, диаграмма растяжения „ $F-\Delta l$ “ и рассчитанная из нее с учетом изменения площади сечения образца зависимость „ $\sigma-\delta$ “. В таблице представлены экспериментально полученные значения величин прочности и пластичности, а также энергетические характеристики деформации стали 12X18H10T. Из приведенных данных следует, что в ходе деформации облученная нейтронами сталь аккумулирует меньше энергии, а рассеивает существенно больше, чем необлученная, и это согласуется с ранее полученными результатами [6]. Из рис. 1 видно также, что

Механические и энергетические характеристики необлученной и облученной нейтронами ( $5 \cdot 10^{22}$  н/м<sup>2</sup>) стали 12Х18Н10Т

Состояние стали и температура испытания, К		$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_0$ , %	$\delta$ , %	$A$ , МДж/м <sup>3</sup>	$Q$ , МДж/м <sup>3</sup>	$E_s$ , МДж/м <sup>3</sup>	$10^{-4} \times k$ , для области 1, на рис. 2	$ E_0 $ , МДж/м <sup>3</sup>
Необл.	298	18	660	65	70	410	310	100	1.5	6
Обл.		440	720	53	61	405	332	73	1.4	25
Необл.	423	140	440	34	37	140	90	50	1.8	5
Обл.		330	530	37	42	200	152	48	1.8	18
Необл.	473	140	470	33	36	142	96	46	2.0	5
Обл.		320	500	29	34	162	119	43	2.0	16

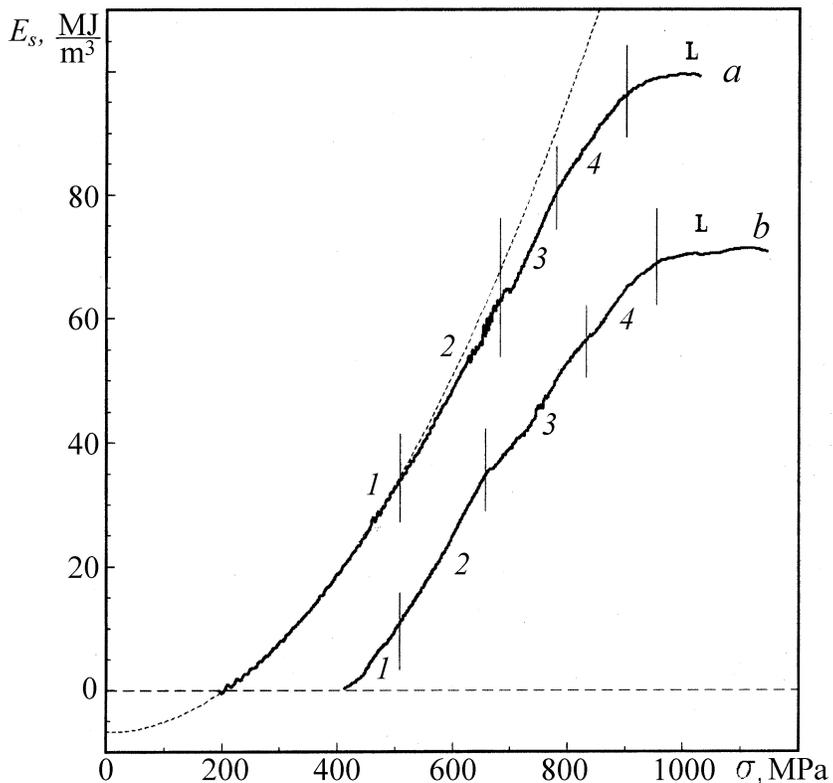
истинное напряжение течения возрастает вплоть до разрушения образца и этому моменту на восстановленной термограмме соответствует мощный выброс тепла. С увеличением степени деформации скорость накопления латентной энергии снижается, а по достижении предела прочности и в ходе развития локализованной деформации материал практически не запасает энергии.

На рис. 2 приведены зависимости величины удельной латентной энергии от напряжения течения  $\sigma$ . Видно, что эти графики для исходного и для облученного материалов подобны, но кривая для облученной стали смещена в сторону меньших значений  $E_s$ . Анализ формы кривой  $E_s = f(\sigma)$  показал, что в области равномерной деформации на ней можно выделить несколько участков. На первом из них, соответствующем небольшим значениям деформаций и напряжений, взаимосвязь между  $E_s$  и  $\sigma$  подчиняется соотношению вида:

$$E_s = E_0 + k \cdot \sigma^2, \quad (1)$$

где  $E_0$  и  $k$  — коэффициенты, которым можно придать определенный физический смысл.

Так, наиболее вероятно, что модуль величины  $E_0$  характеризует внутреннюю энергию поликристалла, обусловленную исходным (до деформации) структурным состоянием материала: разветвленностью границ зерен, морфологией и концентрацией дефектов кристаллической



**Рис. 2.** Зависимость латентной энергии от напряжения течения для исходного (*a*) и облученного нейтронами (*b*) образцов стали 12X18H10T, деформированных при 293 К. Показана аппроксимирующая парабола для участка *1*. Участок *L* соответствует локализации деформации.

решетки. Численное значение  $E_0$  может быть найдено из экспериментальной кривой  $E_s = f(\sigma)$  путем продолжения аппроксимирующей параболы до значения  $\sigma = 0$  (рис. 2). Обнаружено (см. таблицу), что для необлученной стали при различных температурах растяжения (293 ÷ 473 К) значения  $E_0$  очень близки, что может служить некоторым

подтверждением структурной чувствительности  $E_0$ . В то же время для облученной стали с ростом температуры испытания величина  $E_0$  уменьшается, что связано, вероятно, с частичным отжигом радиационных дефектов при нагреве образца до температуры испытания. Отметим, что квадратичная зависимость запасенной энергии от напряжения течения на ранних стадиях деформирования была установлена нами также для чистой меди, необлученной и облученной нейтронами ( $2 \cdot 10^{24}$  н/м<sup>2</sup>) [10].

Всего на кривых  $E_s = f(\sigma)$  как для исходной, так и для облученной стали 12X18H10T (рис. 2) до предела прочности может быть выделено 4 участка, что не противоречит представлениям о стадийности пластического течения, когда в деформируемом материале последовательно образуются и доминируют различные дислокационные структуры [1]. Из рис. 2 видно также, что кривая „ $E_s - \sigma$ “ для облученной стали смещена в область меньших значений  $E_s$  на  $\sim 20$  МДж/м<sup>3</sup>, что связано, вероятно, с дополнительной латентной энергией, обусловленной радиационными дефектами.

Обращают на себя внимание некоторые особенности температурных изменений параметра  $k$  для первого выделенного участка (см. таблицу) — чем выше температура испытания, тем больше  $k$ . Факт температурной чувствительности  $k$  в данном случае можно связать с увеличением энергии дефекта упаковки (ЭДУ) нержавеющей стали при повышении температуры [8,9].

**Заключение.** Экспериментально, на непрерывно деформируемом внутри калориметрической ячейки образце, изучена взаимосвязь между величинами латентной энергии и напряжением течения нержавеющей стали 12X18H10T, аустенизированной и облученной нейтронами ( $5 \cdot 10^{22}$  н/м<sup>2</sup>).

Показано, что на кривой  $E_s(\sigma)$  может быть выделен ряд участков, на начальном из которых  $E_s \sim k \cdot \sigma^2$ .

## Список литературы

- [1] *Большанина М.А., Панин В.Е.* Скрытая энергия деформации // Исследования по физике твердого тела. М.: Академиздат, 1957. 277 с.
- [2] *Рыбин В.В.* Большие пластические деформации и разрушение металлов. М., 1986. 224 с.
- [3] *Фридель Ж.* Дислокации. М.: Мир, 1967. 643 с.

- [4] *Максимкин О.П.* Автоматизированный комплекс установок и экспериментальные методики для исследования физико-механических свойств облученных материалов. Препринт ФТИ НАН РК 94-02. Алматы, 1994. 32 с.
- [5] *Максимкин О.П., Гусев М.Н.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 24. С. 85-89.
- [6] *Ибрагимов Ш.Ш., Максимкин О.П., Болотов А.В.* // Атомная энергия. 1989. Т. 66. № 6. С. 430-431.
- [7] *Астафьев И.В., Максимкин О.П.* // Заводская лаборатория. 1994. № 1. С. 44-46.
- [8] *Петров Ю.Н.* Дефекты и бездиффузионное превращение в стали. Киев: Наук. думка, 1972. С. 101.
- [9] *Maksimkin O.P., Gusev M.N.* // Effects of Radiation on Materials: 20th International Symposium. ASTM STP 1405. 2001. P. 813-824.