

Металлургия и материаловедение

УДК 620.191.33

Низкотемпературный вязкохрупкий переход и внутреннее трение

В.С. Ачикасова, В.В. Лепов

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

С целью анализа процессов накопления повреждений и разрушения ОЦК-сталей при низких температурах исследовано явление вязкохрупкого перехода. Для выявления механизма микроструктурных изменений, происходящих при низкотемпературном вязкохрупком переходе, применен метод внутреннего трения. Впервые показано, что это явление не связано, как полагали ранее, с межатомным взаимодействием, а обусловлено флуктуациями на очагах разрушения в виде микротрещин и дальнейшим их ростом по дислокационному механизму, при этом разрыв связей происходит при неупругом рассеянии фононов и под действием растягивающих напряжений. В дальнейшем планируется использовать выявленный механизм для численного моделирования процессов разрушения сталей и сплавов, находящихся в поликристаллическом и наноструктурном состоянии.

Ключевые слова: внутреннее трение, накопление повреждений, механизм разрушения, низкие температуры, вязкохрупкий переход.

A ductile-brittle transition phenomenon has been studied to analyze the damage nucleation processes in BCC metal at low temperatures. The internal friction method was applied to reveal the mechanism of dislocation microstructure changes during the low-temperature ductile-brittle transition. It has been shown for the first time that the transition is not connected with interatomic interactions but is stipulated by thermofluctuations on the fracture nuclei such as microcracks and by their further dislocation growth. The bond breakages occurred by the inelastic scattering of phonons and under the applied tension stress. From now on, it is supposed to apply the proposed mechanism for theoretical and numerical modeling of damage and fracture for polycrystalline and nanostructured steel and alloys.

Key words: internal friction, damage nucleation, fracture mechanism, low temperatures, ductile-brittle transition.

Известно, что при эксплуатации в условиях низких климатических температур часто происходит катастрофическое хрупкое разрушение элементов конструкций и деталей машин. Наиболее подвержены охрупчиванию при низких температурах конструкционные материалы, имеющие объемно-центрированную кубическую (ОЦК) решетку, в первую очередь железо и многие конструкционные стали. Для таких материалов присуще такое известное явление как вязкохрупкий переход, которое характеризуется резким снижением пластических свойств. При этом происходит изменение характера разрушения от вязкого к хрупкому [1].

Многообразие явления вязкохрупкого перехода отражается факторами, влияющими на тип

разрушения, как внутренними, так и внешними. При этом химический состав и структура материала отражают физическую природу явления, а скорость нагружения, температура, вид напряженно-деформированного состояния и размер конструкции – механическую.

Для металлов и сплавов с ОЦК-решеткой, применяемых в конструкциях для низких климатических температур, в исследуемой области температур наблюдается вязкохрупкий переход, определяемый ударными испытаниями. Необходимо отметить, что до настоящего времени нет четко выясненного структурного механизма процесса, происходящего в интервале вязкохрупкого перехода «...теория вязкохрупкого перехода должна учитывать радикальное изменение дислокационной структуры вблизи $T = T_{кр}$, изменение энергоемкости излома, вида и характера пластической зоны и т.д.» [2].

Метод внутреннего трения является одним из самых чувствительных методов при исследова-

АЧИКАСОВА Валентина Семёновна – вед. инженер-электронщик, e-mail: achikasova@iptpn.ysn.ru; ЛЕПОВ Валерий Валерьевич – д.т.н., зам. директора, e-mail: leпов@iptpn.ysn.ru.

нии тонкой структуры металлов и сплавов. Измерения характеристик внутреннего трения производят в широком диапазоне частот. Измерения в области вязкохрупкого перехода материалов с ОЦК-решеткой удобно проводить при низких частотах (порядка несколько герц), т.к. внутреннее трение чувствительно к различного рода нарушениям и перестройкам структуры на уровне кристаллической решетки и поэтому часто используется исследователями для изучения реальной дефектной структуры кристаллов.

В настоящей работе измерения внутреннего трения проведены широко применяемым для динамического механического анализа металлических материалов методом свободных крутильных колебаний [3,4]. В качестве реализации метода использован обратный крутильный маятник. Нижний конец исследуемого образца, в наших экспериментах имеющего форму проволоки, закреплялся неподвижно, а верхний конец жестко соединялся с инерционной деталью, подвешенной на торсионах. В системе возбуждались крутильные колебания. После устранения вынуждающей силы маятник совершал затухающие колебания, измерение основных параметров которых (в нашем случае изменение амплитуды колебаний, т.е. число колебаний) позволяло вычислить вязкоупругие характеристики исследуемого образца материала.

В качестве исследуемого материала в данном случае выбрана конструкционная сталь 09Г2. Данный материал имеет ОЦК-решетку, для которого характерен низкотемпературный вязкохрупкий переход. Исследовались проволоочные образцы диаметром 1 мм с рабочей длиной порядка 10 см. Задавалась относительная деформация порядка 10^{-5} при частоте колебания маятника 1 Гц.

Величину внутреннего трения определяли по формуле [4]:

$$Q^{-1} = \frac{\ln K}{\pi n},$$

где Q^{-1} – величина, обратная механической добротности; n – число колебаний в пределах уменьшения амплитуд колебаний от A_n до A_m ;

$K = \frac{A_n}{A_m}$ – число, показывающее, во сколько раз уменьшается начальная амплитуда A_n за n колебаний.

Проведены измерения температурной зависимости внутреннего трения закаленного и отожженного образцов данного материала в интервале температур 100÷300 К.

На температурной кривой внутреннего трения исследуемой стали наблюдается максимум

в интервале ~ 160÷240 К (рис.1). Высота максимума закаленного образца выше, чем у отожженного. Энергия активации максимума, рассчитанная по частотному сдвигу, имеет значение 0,2 эВ. Интервал проявления данного максимума стали 09Г2 совпадает с интервалом проявления вязкохрупкого перехода при ударных испытаниях.

Также в ходе эксперимента исследована резонансным методом температурная зависимость модуля Юнга с определением собственной частоты образца из стали 09Г2.

Температурная зависимость модуля Юнга данного образца представляет собой монотонно возрастающую при понижении температуры линейную зависимость в интервале вязкохрупкого перехода (рис.2).

Аналитические возможности метода внутреннего трения позволяют получить необходимую информацию по исследованию ранних стадий поврежденности в области вязкохрупкого перехода. В условиях микродеформации происходят локальные изменения в субмикроскопической структуре материала. Методы механической спектроскопии позволяют оценивать стадийность развития процессов деградации и накопления поврежденности деформированных малоуглеродистых сталей [5,6]. Известен ряд дислокационных механизмов, вызывающих низкотемпературные неупругие рассеяния энергии в различных металлах и сплавах с ОЦК-ре-

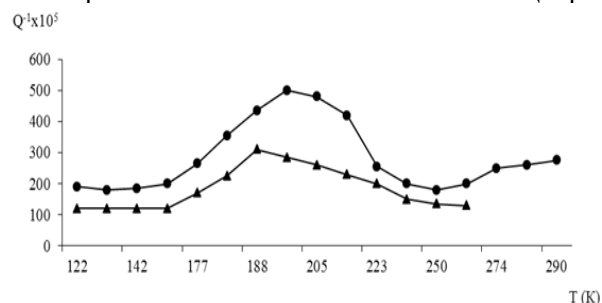


Рис. 1. Температурная зависимость внутреннего трения стали 09Г2: ● – закалка; ▲ – отжиг

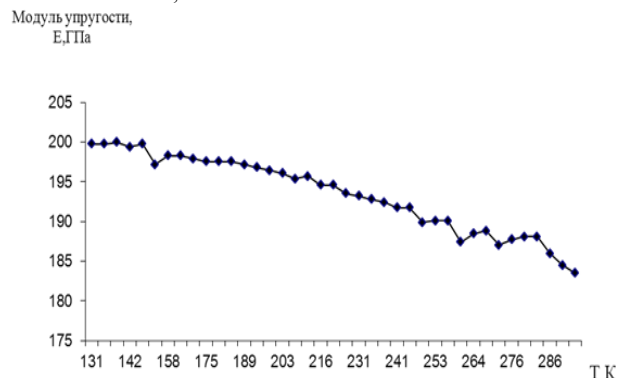


Рис. 2. Температурная зависимость модуля упругости E стали 09Г2

шеткой. Это может быть образование термических или геометрических перегибов при движении дислокаций, взаимодействие дислокаций с точечными дефектами, изменение плотности подвижных дислокаций [7].

Максимум, расположенный в области вязкохрупкого перехода, может быть обусловлен торможением дислокаций в условиях высокой плотности перегибов на краевых дислокациях, соответственно, увеличивается уровень внутренних напряжений.

Монотонная температурная зависимость модуля Юнга в области вязкохрупкого перехода свидетельствует о том, что данный процесс никак не связан с межатомным взаимодействием [8,9]. Величина энергии активации 0,2 эВ говорит в пользу дислокационного и фононного механизма, когда в качестве очагов разрушения выступают дефекты в виде микропор и микротрещин [10]. Выбор структурного уровня происходит согласно классическому принципу стационарности действия или наименьшего действия Гамильтона [11]. При этом разрыв межатомных связей происходит по атермическому термофлуктуационному механизму при неупругом рассеянии фононов и под действием растягивающих напряжений, который может быть соответствующим образом численно смоделирован [12,13]. Следует отметить, что исследования внутреннего трения нано- и микрокристаллических сталей и сплавов [14] делают возможным теоретическое и численное моделирование накопления повреждений и разрушения таких материалов в условиях низких температур.

Заключение

Таким образом, исследование температурной зависимости внутреннего трения и модуля Юнга стали 09Г2 показало, что природа максимума связана с процессом вязкохрупкого перехода. Предположительным механизмом вязкохрупкого перехода в ОЦК-сталях является дислокационно-фононный. Хрупкое разрушение обусловлено флуктуациями на очагах в виде микропор микротрещин и дальнейшим их ростом по дислокационному механизму. Ответственными за разрыв связей становятся неупругое рассеяние фононов и внешние растягивающие напряжения.

Работа выполнена в рамках Программы 24.65 фундаментальных исследований Президиума РАН и проекта РФФИ 12-01-98515.

Литература

1. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов / В.И. Трефилов, В.Ф. Моисеев, Э.П. Печковский и др.; под ред. В.И. Трефилова; АН УССР, Ин-т проблем материаловедения им. И.Н. Францевича. 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наукова думка, 1989. – 256 с.
2. Владимирцов В.И. Физическая природа разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
3. Головин С.А., Пушкар А. Микропластичность и усталость металлов. – М.: Металлургия, 1980. – 240 с.
4. Метод внутреннего трения в металловедческих исследованиях: справ. изд. / Под ред. М.С. Блантера и Ю.В. Пигузова. – М.: Металлургия, 1991. – 248 с.
5. Левин Д.М., Чуканов А.Н., Яковенко А.А. Применение механической спектроскопии для изучения субструктурной деградации и начальных этапов разрушения сталей // Известия ТулГУ. Естественные науки. – 2012. – №2.
6. Чуканов А.Н. Возможности внутреннего трения в оценке состояния предразрушения материала // Известия ТулГУ. Серия Физика. – 2006. – Вып. 6. – С.202–210.
7. Кетова В.П., Печеркина Н.Л., Павлов В.А. Изучение дислокационной структуры ОЦК металлов по низкотемпературным спектрам внутреннего трения // Внутреннее трение и тонкое строение металлов и неорганических материалов / Под ред. Ф.Н.Тавадзе. – М.: Наука, 1985. – С.62–65.
8. Ларионов В.П., Семенов Я.С. Физические основы вязкохрупкого перехода низколегированных сталей и сплавов железа. – Новосибирск: Наука, 1992. – 171 с.
9. Семенов Я.С. Теория вязкохрупкого перехода сталей и сплавов железа. Обоснование механизма вязкохрупкого перехода // ДАН. – 2007. – Т. 416, № 6, – С. 780–783.
10. Бартенев Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров. – М.: Химия, 1984. – 280 с.
11. Веретенников В.Г., Синицын В.А. Метод переменного действия. 2-е изд. – М.: Физматлит, 2005. – 272 с.
12. Валишин А.А. Комплекс математических моделей механизма разрушения полимеров: дис. ... д.ф.-м.н. – М., 2007.
13. Юркин Ю.А. Верификация математических моделей механохимической кинетики трения и накопления повреждений в конструкционных материалах при разрушении: дис. ... к.т.н. – М.: ГОУВПО МГУС, 2007.
14. Грязнов М.Ю., Чувильдеев В.Н., Сысоев А.Н., Копылов В.И. Зернограничное внутреннее трение и сверхпластичность нано- и микрокристаллических металлов и сплавов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2010. – №5(2). – С.147–158.

Поступила в редакцию 17.11.2014