

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ АДИАБАТИЧЕСКОГО СДВИГА В МЕДИ МАРКИ М1 МЕТОДОМ СОСТАВНОГО СТЕРЖНЯ ГОПКИНСОНА

© 2015 г. Пухов М.А., Пушков В.А., Борисенко В.А.,
Вяткин Ю.А., Батьков Ю.В.

*Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ,
Саров, Российская Федерация*

m.a.puhov@gmail.com

Поступила в редакцию 09.07.2015

Приведены результаты исследования локализации адиабатического сдвига в меди марки М1 методом составного стержня Гопкинсона. Исследования проводились на образцах шляповидной формы. Построены диаграммы напряжение сдвига – смещение. Определены величины амплитуд и длительностей импульсов нагружения, а также напряжения сдвига, при которых образовался адиабатический локализованный сдвиг в исследованных образцах. Такие исследования необходимы для изучения локализованного сдвига как одного из видов гетерогенной деформации материалов, а также для исследования его связи с параметрами нагружения и микроструктуры с целью построения более обоснованных физических моделей динамического деформирования металлов.

Ключевые слова: динамическое деформирование металлов, адиабатический локализованный сдвиг, амплитуды и длительности импульсов нагружения, диаграммы напряжение сдвига – смещение, составной стержень Гопкинсона.

Введение

Локализация адиабатического сдвига для пластичных металлов является одним из режимов разрушения и изучается более 50 лет [1]. Актуальность ее изучения обусловлена тем, что имеющимися теоретическими подходами этот вид деформации не описывается. Образование адиабатического локализованного сдвига происходит в материалах при высокоскоростном деформировании при определенных условиях нагружения и определенной геометрии образцов. Основным механизмом этого процесса считается быстрый локальный цикл, состоящий из пластического деформирования материала, перехода работы в теплоту и теплового разупрочнения материала [2]. Локализованный сдвиг в меди, сталях, титановых сплавах и других металлах при различных скоростях и длительностях нагружения изучался разными исследователями (главным образом, зарубежными) с вариацией скорости и длительности нагружения. В работе [3] установлено, что образование центров локализации деформации очень чувствительно к начальной плотности дефектов и строению

микроструктуры и развитие полос сдвига зависит от истории и пути деформирования, а также от начального распределения дефектов в материалах. Изучение сложного процесса локализации сдвига сопровождалось в некоторых работах расчетной оценкой температуры в полосе сдвига. Например, для стали 304 расчетная температура в полосе сдвига составила около 3000 К [3, 4], что превышает температуру плавления. В то же время с помощью просвечивающей электронной микроскопии следов плавления обнаружено не было.

В целом же различные исследователи признают, что, несмотря на большой объем полученных данных, развитие локализованного сдвига в материалах изучено недостаточно. Такие исследования необходимы для изучения локализованного сдвига как одного из видов гетерогенной деформации материалов, а также для определения его связи с параметрами нагружения и микроструктуры с целью построения более обоснованных физических моделей динамического деформирования металлов.

1. Методика исследований

В процессе разработки методики были проведены эксперименты на шляпо-видных образцах с заранее определенным направлением локализованного сдвига (рис. 1). Размеры образцов тщательно подбирались с целью минимизации пластического деформирования в центральной области и основании образца. Преимущество такой геометрии образца состоит в том, что она способствует образованию полос сдвига вследствие частичного сдерживания образования пустот за счет напряжения сжатия при сдвиге. С другой стороны, недостатком такой геометрии образца является невозможность точного измерения деформации сдвига и эффекта расширения цилиндрического основания в процессе образования сдвига. При возникновении сдвиговой текучести в сечении сдвига нормальное напряжение на шляповидной части и кольцевом основании образца должно быть существенно ниже предела текучести материала образца. По схеме, представленной на рис. 1, проводились исследования локализованного сдвига с помощью метода составного стержня Гопкинсона (ССГ), когда образцы с габаритными размерами $\varnothing 10 \times 5$ мм помещались между торцами мерных стержней.

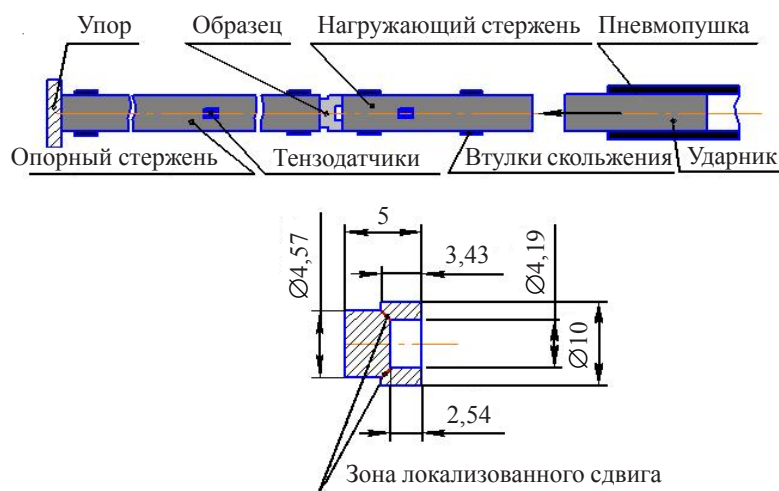


Рис. 1. Схема проведения испытаний и размеры образца на локализованный сдвиг методом ССГ

Импульсная нагрузка в нагружающем стержне создавалась ударниками из стали ХВГ (диаметром 20 мм, длиной 300–420 мм), разгоняемыми с помощью пневматической пушки до скоростей от 4 до 8 м/с. В опытах регистрировалась скорость ударника и импульса деформации в нагружающем и опорном стержнях. По импульсам определялось смещение торцов образца относительно друг друга и напряжение сдвига в образце.

На рис. 2 представлена схема регистрируемых в опытах упругих импульсов деформации в падающей (ϵ_i), отраженной (ϵ_r) и проходящей (ϵ_t) волнах. В сечении локализованного сдвига, обозначенном схематически на рис. 2, действует нормальное напряжение определенной величины, а также напряжение сдвига.

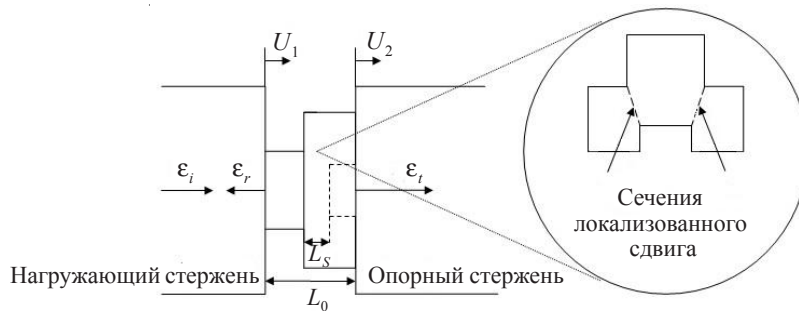


Рис. 2. Схематическое изображение образца, мерных стержней с регистрируемыми импульсами упругой деформации и локализованного сдвига

На рис. 2 обозначено: L_0 – номинальная длина образца, L_s – длина сдвигового сечения, U_1 и U_2 – смещения обоих краев образца.

Расчет истинного напряжения сдвига основывается на предположении, что сила сдвига действует только в сдвиговом сечении между двумя краями образца (сечение АВ на рис. 3). Схема определения сдвиговой компоненты нагружения показана на рис. 3, где P_s и P_n – сдвиговая и сжимающая компоненты нагружения без учета эффекта расширения цилиндрического основания.

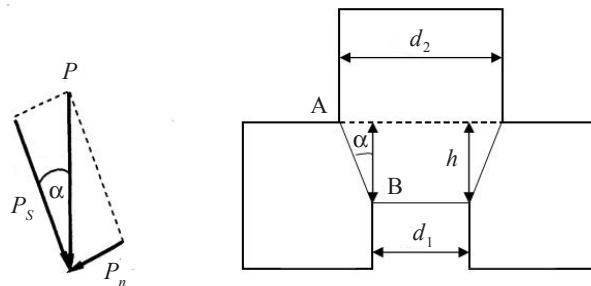


Рис. 3. Схема определения сдвиговой компоненты нагружения без учета эффекта расширения при величине угла α

Угол α в проведенных опытах составляет 12° . Напряжение сдвига рассчитывается по следующим формулам:

$$\sigma_s = \frac{P_s}{S}, \quad P_s = P \cos \alpha, \quad S = \pi \left(\frac{d_1}{2} + \frac{d_2}{2} \right) \sqrt{h^2 + \left(\frac{d_2 - d_1}{2} \right)^2},$$

где S – рабочая площадь образца.

Адиабатический локализованный сдвиг был достигнут в образцах при скоростях нагружения порядка 4,5–7,7 м/с.

2. Результаты исследований

Нагружение образцов из меди марки М1 проводилось ударниками длиной 420 и 300 мм, разгоняемыми со скоростями 4,5 и 5,3 м/с. Длительности нагружающих импульсов в опытах составили $t_1 = 168$ и $t_2 = 120$ мкс, а амплитуды нагружающих импульсов $A_1 = A_2 = 400$ МПа. Смещение образцов, измеренное после проведения опытов, составило 1,7 и 2,6 мм соответственно.

На рис. 4 представлены зависимости напряжения сдвига от смещения для меди М1.

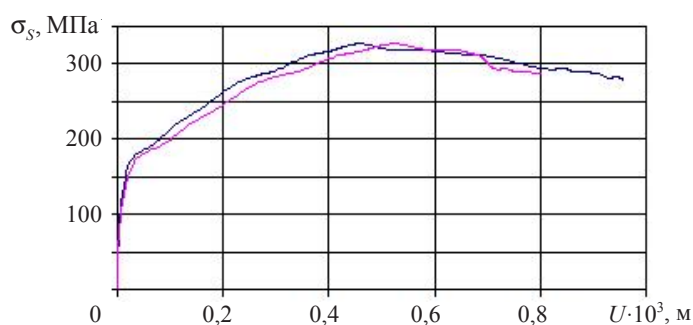


Рис. 4. Изменение напряжения сдвига в зависимости от смещения для меди М1

Из рис. 4 видно, что зависимости напряжение сдвига – смещение имеют характерный вид с ярко выраженной точкой максимального напряжения сдвига $\sigma_s = 325$ МПа, после которой наблюдается спад. Такая реакция отражает состояние насыщения способности к деформационному упрочнению и указывает на точку, начиная с которой при дальнейшем деформировании образца начинают преобладать процессы разупрочнения. С точки зрения критерия максимального напряжения для возникновения неустойчивости, широко используемого при анализе адиабатического сдвига, максимум напряжения сдвига обычно рассматривается как точка начала неустойчивости, после которой деформирование материала начинает локализовываться в виде полосы сдвига. Образование полос сдвига в этих опытах подтверждается и при исследовании микроструктуры испытанных образцов. Для иллюстрации на рис. 5 показан разрезанный образец, на котором видна локализованная зона сдвиговой деформации.

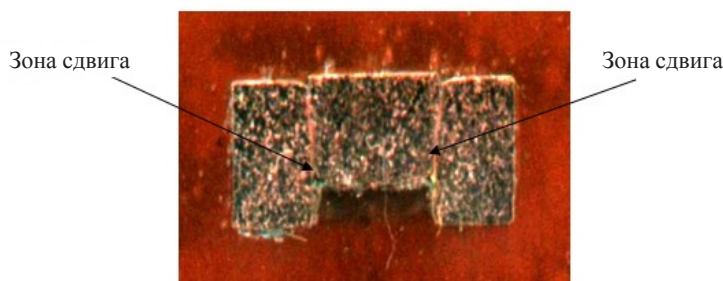


Рис. 5. Макроструктура медного образца, испытанного на локализованный сдвиг

На рис. 6 представлена микроструктура зон сдвига, которые образовались в проведенных опытах. В этих зонах наблюдается локализованная полоса сдвига.

Опыт №1 (медь), $t = 168$ мкс, $A = 400$ МПа Опыт №2 (медь), $t = 120$ мкс, $A = 400$ МПа
Смещение $\Delta = 1,7$ мм Смещение $\Delta = 1,6$ мм

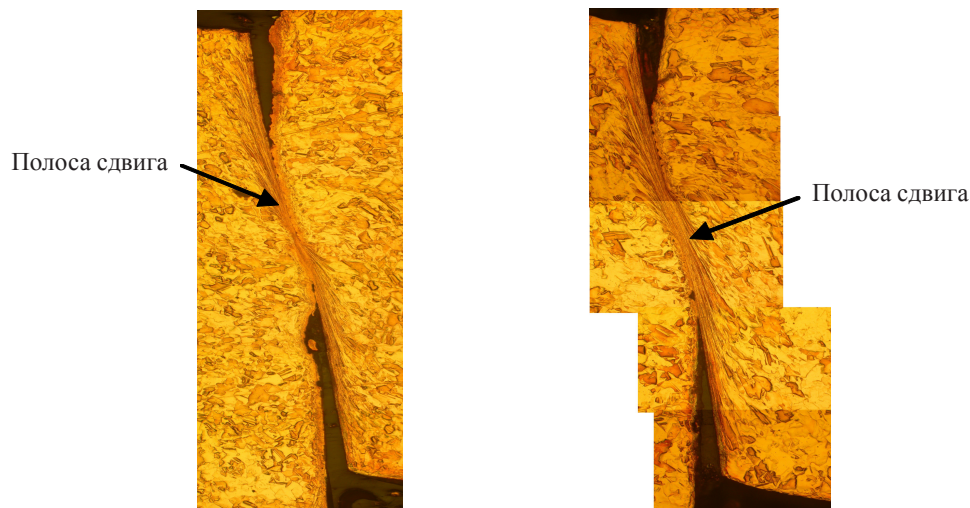


Рис. 6. Микроструктура зон сдвига

Выводы

Получены результаты испытаний меди М1, построены диаграммы напряжение сдвига – смещение и проведен анализ результатов. В процессе исследования были определены величины амплитуд и длительностей импульсов нагружения, а также напряжения сдвига, при которых образовался адиабатический локализованный сдвиг в образцах заданной геометрии. Для более точного определения напряжения, при котором начинается образование локализованной полосы сдвига, для определения деформации сдвига и скорости деформации в зоне локального сдвига необходимо провести серию экспериментов, используя импульсы нагружения различной длительности. В таких экспериментах будет фиксироваться характер развития локализации сдвига в образцах на различных стадиях (начало образования локализованного сдвига и полный сдвиг).

Полученные результаты подтвердили возможность проведения подобных испытаний на образцах указанной геометрии с помощью метода ССГ.

Список литературы

1. Rogers H.C. Adiabatic Plastic Deformation. *Ann. Rev. Mater. Sci.* 1979. Vol. 9. P. 283–311.
2. Bai Y., Dodd B. *Adiabatic Shear Localization*. Oxford, UK: Pergamon Press, 1992. 388 p.
3. Xue Q., Gray III G.T., Henrie B.L., Maloy S.A., Chen S.R. Influence of shock prestraining on the formation of shear localization in 304 stainless steel. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 2005. Vol. 36A. P. 1471–1486.
4. Xue Q., Gray III G.T. Development of adiabatic shear bands in annealed 316L stainless steel: Part I. Correlation between evolving microstructure and mechanical behavior. *Metallurgical and Materials Transactions A*. August, 2006. Vol. 37A. P. 2435–2446.

5. Hartman K.H., Kunze H.D., Meyer L.W. *Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals*. Eds: M.A. Meyers, L.E. Murr. New York: Plenum Press, 1981. P. 325–337.

6. *Исследование динамической прочности конструкционных материалов*: Учеб. пособие. СарФТИ. Авт.-сост.: А.П. Большаков, А.М. Брагов, Н.Н. Гердюков и др. Саров, 2003. 140 с.

References

1. Rogers H.C. Adiabatic Plastic Deformation. *Ann. Rev. Mater. Sci.* 1979. Vol. 9. P. 283–311.

2. Bai Y., Dodd B. *Adiabatic Shear Localization*. Oxford, UK: Pergamon Press, 1992. 388 p.

3. Xue Q., Gray III G.T., Henrie B.L., Maloy S.A., Chen S.R. Influence of shock prestraining on the formation of shear localization in 304 stainless steel. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 2005. Vol. 36A. P. 1471–1486.

4. Xue Q., Gray III G.T. Development of adiabatic shear bands in annealed 316L stainless steel: Part I. Correlation between evolving microstructure and mechanical behavior. *Metallurgical and Materials Transactions A*. August, 2006. Vol. 37A. P. 2435–2446.

5. Hartman K.H., Kunze H.D., Meyer L.W. *Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals*. Eds: M.A. Meyers, L.E. Murr. New York: Plenum Press, 1981. P. 325–337.

6. *Исследование динамической прочности конструкционных материалов*: Учеб. пособие. СарФТИ. Авт.-сост.: А.П. Бол'шаков, А.М. Брагов, Н.Н. Гердюков и др. Саров, 2003. 140 с.

INVESTIGATION OF THE LOCALIZATION OF ADIABATIC SHEAR IN M1 COPPER USING SPLIT HOPKINSON BAR METHOD

Puhov M.A., Pushkov V.A., Borisenok V.A., Vyatkin Yu.A., Batkov Yu.V.

*Sarov Physics and Technical Institute of National Research Nuclear University MEPhI,
Sarov, Russian Federation*

The results of investigating the localization of adiabatic shear in M1 copper using the split Hopkinson bar are presented. Hat-shaped specimens were used in the tests. Shear stress – displacement diagrams are constructed. The amplitude and duration values of loading pulses are determined, as well as the shear stresses resulting in localized adiabatic shear in the tested specimens. Such investigations are required for studying localized shear as one of the types of heterogeneous deformation of materials, as well as for analyzing its relation with loading and microstructure parameters to be able to construct more substantiated physical models of dynamic deformation of metals.

Keywords: dynamic deformation of metals, adiabatic localized shear, amplitudes and durations of loading pulses, shear stress-displacement diagrams, split Hopkinson bar.