———— ФИЗИКА ——

УДК 539.219

ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ

© 2020 г. С. Н. Буравова^{1,*}, И. С. Гордополова¹, Е. В. Петров¹,

член-корреспондент РАН М. И. Алымов¹

Поступило 16.10.2019 г. После доработки 25.11.2019 г. Принято к публикации 29.11.2019 г.

Мощные ультразвуковые колебания твердого тела, возникающие при ударно-волновом нагружении, являются результатом взаимодействия волн сжатия и разгрузки с гранями образца и между собой, которое протекает в форме стоячих волн. Ударно-волновой ультразвук сопровождает процесс локализации пластической деформации. Показано, что длительность осцилляции образца возрастает по сравнению со временем ударной нагрузки. Быстрое охлаждение металла внутри полос локализации, размер которых не превышает нескольких десятков микрон, свидетельствует, что изменение фазового состава происходит в результате холодной деформации.

Ключевые слова: ударная волна, локализация пластической деформации, ультразвуковые колебания, осцилляция, стоячая волна

DOI: 10.31857/S2686740020010095

Впервые полосы сдвига наблюдал Henri Tresca в 1878 г., который определил, что низкая теплопроводность и низкая теплоемкость материала являются необходимыми условиями этого явления. Полосы локализованной деформации наблюдаются во многих высокоскоростных процессах, таких как взрывное дробление, высокоскоростная механическая обработка металлов давлением, эрозия, криогенная обработка, сварка взрывом, пробивание брони снарядом. В 1944 г. С. Zener и J.H. Hollomon [1] впервые связали образование полос сдвига с нестабильностью пластического течения. Причиной локализации деформации, по общепринятым представлениям, является потеря устойчивости пластического течения как результат выделения тепла в условиях близких к адиабатическим и последующего термического разупрочнения материала.

Полосы локализованной деформации (ПЛД) являются предвестниками разрушения, поэтому понятен интерес к изучению процесса локализации деформации. Ширина полос меняется в широких пределах от 1 до 50 мкм. В настоящее время благодаря структурным исследованиям известно,

¹Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук, что материал внутри ПЛД подвергается фрагментации: размер частиц достигает 0.05-0.5 мкм, в сталях могут наблюдаться более мелкие зерна, порядка 0.01-0.05 мкм [2]. Экспериментально обнаружено изменение фазового состава в ПЛД: растворение частиц упрочняющей фазы, карбидизация перлита и образование глобулярного цементита в сталях, при этом размер глобулей может достигать 3 мкм [3, 4]. Окисление фрагментов металлов (медь, алюминий, титан, сталь с перлитоферритной структурой) проявляется в образовании покрытий ультратонкой пленки, состоящей из шишкообразных частиц-зародышей оксидов металлов, размер которых не превышает 50 нм [5]. Обнаружена миграция частиц (ультратонкие частицы упрочняющей фазы, атомы внедрения и замешения, примесные элементы) из матричного материала к местам ПЛД, это получило название эффект самозалечивания.

Деформация при импульсном нагружении осуществлялась ударом пластины, разогнанной зарядом взрывчатого вещества. Образец в форме полого стального цилиндра с наружным диаметром 20 мм и внутренним 6 мм подвергался удару алюминиевой пластины — ударником толщиной 2 мм и диаметром 60 мм. Пластина-ударник разгонялась накладным зарядом аммонита 6ЖВ, скорость удара составляла 700 м/с. Интерференция боковых волн разгрузки создает в образце откольную поврежденность цилиндрической формы с узкой зоной интерференции. Форма образ-

Черноголовка, Московская обл., Россия

^{*}E-mail: svburavova@yandex.ru

КМ

Рис. 1. Микроструктура меди в области перехода откольной трещины в полосу локализации деформации.

ца, в которой образуется цилиндрическая ПЛД, удобна, поскольку шлиф можно изготавливать в произвольно выбранных продольных сечениях.

Пример структуры меди в ПЛД демонстрирует рис. 1. Сильно деформированный материал с большим количеством микропор, размер которых не превышает 400 нм, наблюдается для всех изученных металлов (сталь, алюминий, титан).

Несмотря на многочисленные исследования найти корреляцию между образованием и развитием ПЛД, физико-механическими свойствами материала и условиями нагружения не удавалось. Общепризнанная модель Зинера—Холломона, основанная на тепловом разупрочнении металла в ПЛД, не смогла установить физические законы, управляющие зарождением и развитием процесса локализации деформации.

Откольная модель локализации деформации была установлена экспериментально и опубликована в работах [6, 7]. Откол – это вид импульсной повреждаемости, которая возникает в зоне интерференции волн разгрузки при напряжениях, превышающих откольную прочность. При напряжениях растяжения, не превышающих динамическую прочность, когда в зоне интерференции волн разгрузки сохраняется сплошность материала, возникает незавершенная откольная трещина, она и является ПЛД. Согласно откольной модели локализации пластической деформации, геометрический фактор расположения свободных поверхностей (граней) определяет место зарождения полос локализации и их развитие. Поэтому и не удавалось найти связь ПЛД с механическими свойствами материала. Локализация деформации возникает в результате высокоскоростного растяжения, а не теплового разупрочнения.

Из откольной природы образования ПЛД следует важный факт (и неожиданный): процесс локализации пластической деформации в условиях ударного нагружения сопровождается осцилляцией образца. Действительно, откольный характер повреждения возникает при наличии по крайней мере двух свободных поверхностей, источников волн растяжения (разгрузки), ориентированных, как правило, параллельно. В каждом сечении образца прохождение ударной волны порождает боковые волны разгрузки. Каждая волна разгрузки проходит все сечение образца до противоположной грани, отражается от нее волной сжатия и возвращается в исходное положение. Возникающая осцилляция является собственным колебанием образца.

Период колебания волн составляет $T = 2\delta/c_0$ и находится в ультразвуковом режиме колебаний, здесь δ – расстояние между источниками волн разгрузки, c_0 — скорость звука. В отличие от ультразвука, генерируемого приборами, взрывной (ударный) ультразвук возникает самостоятельно, без всякого вмешательства извне. Механизм, приводящий к образованию осцилляции, включает отражение волн на свободных гранях образца, где происходит взаимодействие (интерференция) падающей волны со своей отраженной волной противоположного знака, характеризуется изменением направления скорости движения граней (волна разгрузки преобразуется в волну сжатия, и наоборот). Столкновение отраженных от разных граней волн приводит к торможению движения. В зоне интерференции волн разгрузки материал неподвижен. Взаимодействие волн (разгрузки или сжатия) между собой и с гранями с неизбежностью приводят к деформированию образца в форме стоячей волны [8, 9]. Грани образца, где напряжение всегда равно нулю, являются пучностями стоячей волны. Зона интерференции встречных волн, где частицы сохраняют неподвижность – узлы стоячих волн. Расстояние между двумя соседними узлами или пучностями составляет половину длины волны $\lambda/2$, равную толщине образца. Согласно откольной модели, ПЛД зарождаются и эволюционируют в узлах стоячей волны, где происходит периодическая смена циклов сжатие-растяжение. Стоячие волны характеризуются образованием "энергетически замкнутого отсека", участков от узла до пучности ($\lambda/4$), который не обменивается энергией с остальными частями образца, поэтому колебательный процесс может продолжаться без действия внешних сил, после прохождения фронта ударной волны.

Рисунок 2 демонстрирует продольный шлиф, отражающий свойства стоячей волны.

Как видно из рис. 2, в образце под действием боковых волн разгрузки сформировалось несколько ПЛД, в которых обнаруживаются ультратонкие фрагменты стального материала. Основное собственное колебание с частотой $\gamma = c_0/2\delta$ и длиной волны, равной 2 δ , формируется, как правило, в центральной части образца. В симметричной стоячей волне частицы среды то приближаются с двух сторон к узлу, то от него удаляются. В процессе деформирования вокруг основного тона образуются дополнительные новые полосы локализации с собственными длинами волн. В литературе дополнительные нормальные (собственные) колебания называют обертонами. В одной четверти длины основной волны укладывается нечетное число

полуволн-обертонов:
$$\frac{\lambda}{4} = n \frac{L}{2}$$
 ($n = 1, 3, 5, ...$) [9].

Осцилляции продолжаются до тех пор, пока волны не затухнут в результате необратимых потерь. Из геометрического представления законов сохранения следует, что энергия, переходящая в тепло, на P-V-диаграмме равна площади, ограниченной прямой Рэлея и изэнтропой нагрузки [10]. Амплитудный коэффициент затухания α определен в работе [3] и выражается формулой: $\alpha \approx$

 $\approx \frac{\sigma_y(\sigma_s - \sigma_g)}{3\sigma_s^2}$, здесь σ_g – динамический предел

упругости Гюгонио, σ_y — динамический предел текучести, σ_s — откольная прочность материала. Коэффициент 2 α представляет долю энергии ударно сжатого материала, перешедшую в тепло. Характерное время ослабления в *е* раз амплитуды ультразвуковых колебаний равно $T_e \approx \frac{1}{\alpha_s}$ и составляет для

α_s меди 68.9 мкс. Слабое затухание амплитуды стоячей волны способствует увеличению времени деформирования образца по сравнению со временем действия ударного импульса (0.75 мкс).

Физико-химические процессы, определяющие структуру в ПЛД, зависят от температурного режима в полосах. Экспериментально измерить температуру в полосах локализации в настоящее время не представляется возможным, поэтому она вычисляется. По разным источникам расчетная температура равна 500-800°С. Модели деформированного твердого тела Джонсона-Кука (Johnson-Cook) и Зерилли–Амстронга (Zerilli–Armstrong), наиболее часто используемые в расчетах температуры в полосах локализации, содержат пять подгоночных параметров. Считается, что в результате перехода работы пластической деформации в тепло практически мгновенно достигается высокая температура в ПЛД, которая в адиабатических условиях приводит к разупрочнению материала [11]. Заметим, что для описания импульсных процессов такие модели не пригодны [12], поскольку они неадекватно описывают процессы за фронтом ударной волны, не учитывают ампли-



Рис. 2. Обертоны стоячей волны в продольном сечении стального образца с исходной перлитоферритной структурой материала.

туду волны, плотность, изменение предела текучести, пластические свойства материала.

Согласно откольной модели локализации деформации ПЛД возникают в процессе высокоскоростного растяжения, а не в результате теплового разупрочнения. В работе проведено численное решение нестационарного одномерного неоднородного уравнения теплопроводности в частных производных. ПЛД представлялась в виде пластины толщиной L, ограниченной параллельными плоскостями, на обоих гранях которой задавалась постоянная температура, равная остаточной (30°С), а начальная температура задавалась равной температуре за фронтом ударной волны (350°С). В качестве функции интенсивности внутреннего источника нагрева, который является результатом пластической деформации, принято выражение

$$g(x,t) = \frac{600^{\circ}}{T_e} e^{-\alpha t} \left[\frac{\text{град}}{\text{мкс}} \right]$$

Ударные волны в твердом теле до 10-20 ГПА считаются слабыми, поэтому температура за фронтом волны как правило не превышает $350-400^{\circ}$ С. В боковой волне растяжения температура снижается, согласно изэнтропе разгрузки. Поглощение звуковой энергии при ультразвуковой осцилляции образца сопровождается нагревом ПЛД. В функции g(x, t) в числителе следует брать не 600, а 350° С. В работе сознательно увеличена



Рис. 3. Временная зависимость температуры полосы локализации медного образца для различных толщин L (10–50 мкм) в условиях конкуренции теплопроводности и работы внутреннего источника нагрева, $\alpha = 0.0145$.

интенсивность внутреннего источника нагрева с тем, чтобы оценить роль источника.

Рисунок 3 демонстрирует особенности охлаждения ПЛД за счет теплопроводности при наличии внутреннего источника нагрева. Медь, как материал, обладающий малым коэффициентом затухания амплитуды колебаний, характеризуется длительным процессом деформирования образца после прохождения фронта ударной волны. Как видно из рис. 3, процесс охлаждения ПЛД является достаточно быстрым по сравнению с затуханием колебательной деформации образца. Выход на стационарный режим при постепенном снижении интенсивности внутреннего источника тепловыделения происходит под контролем теплопроводности.

Роль источника внутреннего нагрева на начальной стадии охлаждения незначительна, что видно из сравнения с табл. 1. На стационарной стадии в результате конкуренции двух процессов

Таблица 1. Время остывания полосы локализации за счет теплопроводности при мгновенном нагреве до 350°C, коэффициент температуропроводности $a_{C\mu} = 114.531 \text{ мкм}^2/\text{мкc}, g = 0$

<i>L</i> , мкм	10	20	30	40	50
Время охлаждения, мкс	1.00	3.99	8.94	15.90	24.90

Таблица 2. Время остывания полосы локализации в медном образце в зависимости от толщины L (10–50 мкм) при мгновенном нагреве до 600°С

<i>L</i> , мкм	10	20	30	40	50
Время остывания, мкс	1.05	4.21	9.50	16.98	26.24



Рис. 4. Зависимость температуры нагрева полосы локализации медного образца от времени за счет источника внутреннего тепла в присутствии теплоотвода.

работа внутреннего источника нагрева заметно снижает скорость теплоотвода из образца.

В рамках откольной модели локализации деформации процесс охлаждения оказался достаточно быстрым по сравнению с характерным временем деформации образца T_e , и пренебрегать теплопроводностью для объектов микронного размера нельзя.

Представляет интерес сравнить охлаждения ПЛД для меди по откольной модели локализации деформации с остыванием по термомеханической модели, согласно которой имеет место мгновенный нагрев до высокой температуры.

Время охлаждения ПЛД, согласно табл. 2, достаточно большое по сравнению со временем воздействия ударной нагрузки на образец (0.75 мкс). Названием "полосы локализации деформации" в рамках термомеханической модели является название "полоса адиабатического сдвига", которое вполне оправдано.

Рисунок 4 отвечает на вопрос — до какой температуры может нагреться материал в ПЛД за счет действия только внутреннего источника нагрева в условиях теплоотвода для различных толщин L(10—50 мкм).

Как следует из рис. 4, максимальный подъем температуры зависит от толщины ПЛД: чем толще полоса, тем больше тепла успевает накопиться в центральной части полосы до момента прихода волны охлаждения к центру полосы локализации. Спад температуры определяется теплоотводом. Несмотря на достаточно быстрый нагрев за счет деформирования в начальный момент времени и достаточно интенсивный источник внутреннего нагрева, высокие температуры в ПЛД, необходимые для разупрочнения материала, как ранее предполагалось в термомеханической модели локализации деформации, не достигаются.

Откольная модель локализации деформации ответила на нерешенные вопросы термомеханической модели локализации. Зарождение и развитие полос локализации деформации практически не зависит от свойств материала и определяется геометрией образца. Осцилляции образца в режиме стоячей волны, сопровождающие локализацию деформации, в силу своих особенностей, создают благоприятные условия для протекания физико-механических процессов, определяющих структуру материала в полосах локализации. Длительность деформации образца в режиме ультразвуковых колебаний значительно возрастает по сравнению со временем ударной нагрузки. Быстрое охлаждение металла внутри полос локализации, размер которых не превышает нескольких десятков микрон, свидетельствует, что изменение фазового состава происходит в результате холодной знакопеременной деформации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wright T.W.* The physics and mathematics of adiabatic shear bands. UK: Cambridge University Press, 2002. 260 p.

- Meyers M.A., Xu Y.B., Xue Q., et al. // Acta Materialia. 2003. V. 51. Iss. 5. P. 1307–1325.
- 3. Буравова С.Н., Петров Е.В., Алымов М.И. // ДАН. 2016. Т. 469. № 1. С. 34–37.
- 4. *Hwang B., Lee S., Kim Y.C., et al.* // Materials Sci. and Eng. A. 2006. V. 441. Iss. 1/2. P. 308–320.
- Tang Nai-Yong, Niessen P., Pick R.J., et al. // Materials Sci. and Eng. A. 1991. V. 131. Iss. 2. P. 153–160.
- 6. Беликова А.Ф., Буравова С.Н., Гордополов Ю.А. // ЖТФ. 2013. Т. 58. № 2. С. 153–156.
- 7. *Буравова С.Н.* Этюды на тему локализации динамического давления. Saarbrücken: Palmarium Acad. Publ., 2014. 138 с.
- Горелик Г.С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику. М.: Физматлит, 1959. 572 с.
- 9. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 168 с.
- 10. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматлит, 2008. 656 с.
- 11. *Grady D.E., Asay J.R.* // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. № 11. P. 7350–7354.
- Chen D., Fan C., Xie S., et al. // J. Appl. Phys. 2007. V. 101. № 6. P. 063532.

ULTRASONIC OSCILLATIONS FEATURE IN STRAIN LOCALIZATION

S. N. Buravova¹, I. S. Gordopolova¹, E. V. Petrov¹, and Corresponding Member of the RAS M. I. Alymov¹

¹Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Moscow Region, Russian Federation

Received October 16, 2019

Powerful ultrasonic vibrations of a solid that occur during shock wave loading are the result of the compression and unloading waves interaction with the sample faces and with each other, accompany the process of plastic strain localization, and proceed in the form of standing waves. It was shown that the duration of the sample oscillation increases in comparison with the shock load time. The rapid cooling of the metal inside the localization bands, the size of which does not exceed several tens of microns, indicates that the phase composition changes as a result of cold deformation.

Keywords: shock wave, localization of plastic deformation, ultrasonic vibrations, oscillation, standing wave

ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. ФИЗИКА, ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

2020

том 490