

05

Локализация деформации и связь ее с деформированным состоянием материала

© А.Ф. Беликова, С.Н. Буравова, Ю.А. Гордополов

Институт структурной макрокинетики РАН,
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия
e-mail: svburavova@yandex.ru

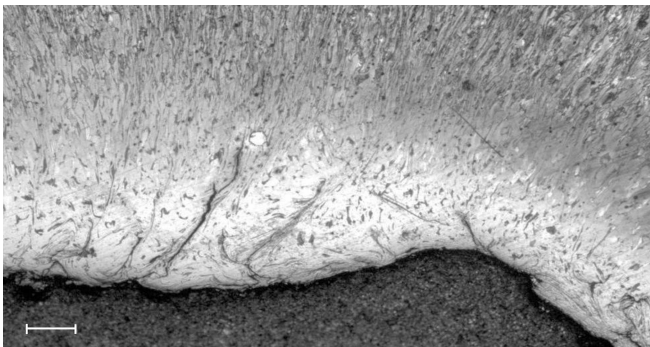
(Поступило в Редакцию 5 июня 2012 г.)

Обнаружение факта прохождения полосы сдвига по недеформированному материалу по-новому ставит вопрос о причинной связи деформации и образования полос сдвига. Процесс коллапса толстостенной трубы рассмотрен с позиций откольного механизма, согласно которому полосы локализованной деформации при импульсных нагрузках являются результатом интерференции волн разгрузки, в зоне растяжения которой величина отрицательных напряжений не превышает прочности материала. Установлено, что радиальные трещины и их продолжения в форме сдвиговых полос возникают на стадии разгрузки, после того как деформационное состояние материала в процессе коллапса уже сформировалось. Иными словами, повреждаемость налагается на деформированный материал, оба эти процесса являются независимыми, они сопутствуют друг другу.

Причиной локализации деформации по общепринятым представлениям является потеря устойчивости адиабатического пластического течения, которое возникает в результате выделения тепла и приводит к термическому разупрочнению материала [1]. Термопластическая модель локализации деформации практически не претерпела изменения до сих пор. Обратим внимание, что, согласно термопластической модели, интенсивная деформация является необходимой для образования полос адиабатического сдвига.

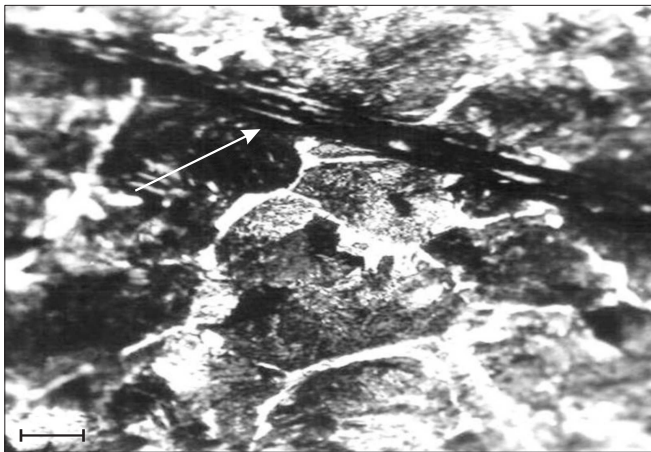
Рис. 1 демонстрирует поперечный шлиф сечения толстостенной стальной трубы после всестороннего обжатия. Кольцевой слой внутренней полости образца характеризуется значительной деформацией, которая проявляется по вытянутым зернам феррита. Рельеф поверхности внутренней полости неровный, имеет выступы и впадины. Радиальные трещины соединяются с внутренней полостью и локализируются во впадинах между выступами рельефа. Трещины переходят в полосы сдвига во внутренних областях материала. В области трещи-

нообразования наблюдается мелкозернистая равноосная структура. Подчеркнем, что полосы сдвига и трещины локализируются в областях интенсивной деформации. Явление коллапса толстостенных цилиндров изучено новосибирскими исследователями на очень высоком уровне [2–4]. Ими показано, что локализация деформации для всех исследованных образцов характеризуется образованием симметричной системы трещин вблизи внутренней поверхности. Роль исходной структуры в иницировании процесса локализации признана незначительной. Медь и фторопласт, имеющие качественно различные структуры, образуют схожую систему трещин вблизи центральной части образца. Интенсивный рост деформации приводит к фрагментации зерен, и структура становится мелкозернистой. При достижении максимальной степени упрочнения (или максимального наполнения двойниками, основным механизмом динамического деформирования) пластическое течение теряет устойчивость, что проявляется в образовании полос сдвига, переходящих в трещины. Характерно, что полосы адиабатического сдвига локализируются в „перемолотой структуре“, в области высокой степени деформации. Авторы [2–4] обнаружили „некристаллографический механизм деформации“, который проявляется в разделении среды на сектора между полосами локализованного сдвига. В процессе коллапса такие сектора перемещаются как единое целое, осуществляя своеобразный характер деформации. Потеря устойчивости пластического течения, приводящая к локализации деформации — это объяснение коллапса полого цилиндра с позиции термопластической модели. Несмотря на многочисленные исследования, как отмечает автор [4], в настоящее время нет представлений о механизме зарождения и развития процесса локализации деформации, отсутствует общее представление о зависимости критических параметров начала локализации от исходных структур. Добавим,



100 μm

Рис. 1. Поперечный шлиф сечения толстостенной стальной трубы после всестороннего обжатия.



100 μm

Рис. 2. Полоса адиабатического сдвига, пересекающая материал со структурой, не претерпевшей заметного деформационного изменения.

что термопластический механизм локализации не может ответить на основной вопрос, почему деформация предпочитает локализоваться в очень тонких полосах.

Рис. 2 иллюстрирует сдвиговую полосу, пересекающую материал со структурой, не претерпевшей заметного деформационного изменения. Полосу адиабатического сдвига, которая проходила через образец без изменения деформационного состояния, наблюдали в [5], причем полоса состояла из очень мелких зерен, претерпевших термомеханическую деформацию или, возможно, процесс возврата. Это по-новому ставит вопрос о причинной связи деформации и образования полос сдвига.

Представляет интерес рассмотреть процесс всестороннего сжатия толстостенной трубы с позиции откольного механизма локализации.

Откольная модель локализации деформации основана на экспериментальных фактах. При нагружении материала плоской ударной волной полосы сдвига никогда не возникают. Отсутствует локализация деформации при боковой разгрузке сжатого материала. Не образуются полосы сдвига при раздутии цилиндра до больших степеней деформации. В реальных условиях динамического эксперимента имеет место взаимодействие волн между собой, со свободными поверхностями, с границами раздела. Используя свойство волновых явлений подчиняться геометрическому фактору расположения свободных поверхностей, экспериментально получены полосы сдвига различного типа (плоские, канальные, угловые, иглоподобные, радиальные, кольцевые) в контролируемых условиях, что обосновывает откольный механизм образования адиабатических полос сдвига [6–10].

Форма волнистого рельефа внутренней полости отражает форму фронта ударной волны в момент выхода ее на свободную поверхность. При сходимости ударной волны к началу координат $r \rightarrow 0$ давление стремится к

бесконечности (согласно закону $P = P_0/\sqrt{r}$, где P — давление во фронте ударной волны). Процессы диссипации, вязкости, сжимаемости, теплопроводности [11] не способны ограничить рост давления, и кумуляция сохраняется. Частным случаем кумуляции является коллапс вселенной [12], который следует из уравнений общей теории относительности. В работах [11,12] высказана гипотеза, что всякая кумуляция неустойчива, но именно она устраняет образование огромного давления при сходимости ударной волны к центру. Это предположение по мнению авторов не противоречит ни одному из известных фактов, но оно не доказано и не опровергнуто до сих пор. Критерии, приводящие к потере устойчивости, остаются неясными.

Потеря устойчивости ударной волны, распространяющейся в толстостенной трубе, проявляется в нарушении ее кольцевой формы. На фронте волны появляются возмущения, перемещающиеся вдоль фронта. Каждое возмущение представляет собой тройную ударную конфигурацию, состоящую из косой волны, продольной волны, фронта волны, по которому перемещаются неоднородности, и которую иногда называют маховской ножкой, и тангенциального разрыва. Рис. 3 иллюстрирует участок фронта ударной волны после потери устойчивости. Давления за поперечной волной и косой близки по величине и превышают давление фронта, по которому распространяется возмущение. При сближении встречных конфигураций в первую очередь сталкиваются поперечные волны, создавая область повышенного давления внутри сжатого материала (P_3). При столкновении поперечных волн имеет место взаимное торможение поперечной составляющей скорости потока. По-видимому, в условиях кумуляции при сходимости ударной волны к центру достигаются условия, близкие к полному гашению поперечной составляющей ско-

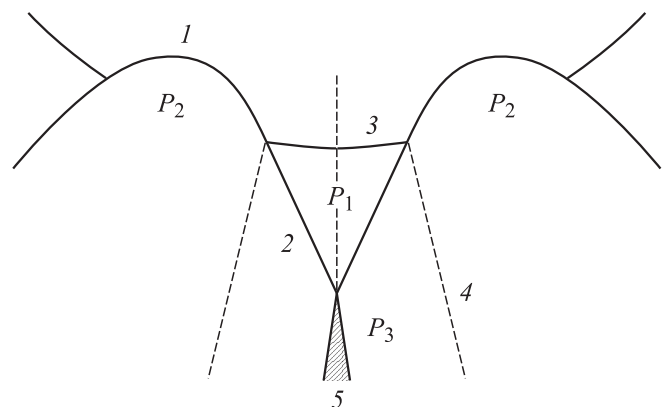


Рис. 3. Схема перемещения тройных конфигураций по фронту ударной волны: 1 — косая ударная волна, 2 — продольная ударная волна, 3 — фронт ударной волны, 4 — тангенциальный разрыв, 5 — область столкновения поперечных волн; P_1 — давление несущей ударной волны, P_2 — давление за косой ударной волной, P_3 — давление в области высокого давления под фронтом ударной волны.

рости, по крайней мере, вблизи внутреннего отверстия образца. Область повышенного давления теряет способность перемещения в поперечном направлении, но сохраняет способность двигаться к фронту ударной волны (в радиальном). При этом выход области повышенного давления на фронт волны генерирует новую неоднородность. Интересна аналогия с неоднородным фронтом детонацией. Передний фронт детонационной волны в газах представляет собой ударную волну, по которой перемещаются тройные ударные конфигурации. Механизмом, который создает новые неоднородности, является выход на фронт ударной волны очагов высокого давления, возникающих при столкновении поперечных волн [13].

В момент, когда неоднородный фронт волны выходит на свободную внутреннюю поверхность образца, выступы (косые волны) первыми подвергаются разгрузке, создавая волны разгрузки. Интерференция волн разгрузки с двух ближайших выступов рельефа создает области растягивающих напряжений в промежутке между выступами, попадая на область высокого давления. Трещины зарождаются между выступами в тех участках, где величина растягивающих напряжений превышает динамический предел прочности материала. По мере углубления трещины интенсивность растягивающих напряжений снижается, и трещины перерастают в полосы адиабатического сдвига. Феномен „некристаллографического механизма деформации“, обнаруженного авторами [5], обязан потери устойчивости ударной волны в процессе ее движения к центру. Области высокого давления под фронтом ударной волны (очаги) делят весь образец на сегменты, которые на фотографиях шлифов ограничены трещинами, образовавшимися в областях высокого давления.

Интересную особенность отметили авторы [14]. Микроструктурные исследования сохраненных образцов в виде шара, подвергнутых действию взрыва несимметричного сферического заряда взрывчатого вещества, показали, что трещины образуются в местах столкновения ударных волн в соответствии с геометрией нагружения там, где величина давления оказалась наибольшей. Вблизи трещин наблюдаются участки локализованного течения, возникновение которых предшествует зарождению трещин.

Таким образом, с позиции откольного механизма локализации деформации повреждаемость в процессе всестороннего сжатия толстостенной трубы возникает на стадии разгрузки, когда деформированное состояние материала в результате коллапса уже закончилось. Поэтому деформированное состояние материала не является необходимым для образования полос локализованной деформации. Это сопутствующие процессы. Феномен узости полос деформации объясняется узкой шириной зоны интерференции волн разгрузки, где при отрицательных давлениях формируются сдвиговые полосы.

Список литературы

- [1] *Wright T.W.* The physics and mathematics of adiabatic shear bands. Cambridge: University Press, 2002. P. 240.
- [2] *Беликова А.Ф., Буравова С.Н., Гордополов Ю.А., Сайков И.В.* Вестн. Тамбовского ун-та. 2010. Т. 15. Вып. 3. С. 908–909.
- [3] *Буравова С.Н., Гордополов Ю.А., Петров Е.В., Полетаев А.В., Рихтер Д.В.* // Деформация и разрушение материалов. 2009. № 7. С. 7–12.
- [4] *Беликова А.Ф., Буравова С.Н., Гордополов Ю.А., Сайков И.А.* // Сб. матер. XIX Петербургские чтения по проблемам прочности, 13–15 апреля. Часть 2. 2010. С. 198–200.
- [5] *Буравова С.Н., Гордополов Ю.А.* // ДАН. 2007. Т. 417. № 6. С. 1–4.
- [6] *Беликова А.Ф., Буравова С.Н.* // Известия ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом. 2010.
- [7] *Нестеренко В.Ф., Бондарь М.П.* // ФГВ. 1994. Т. 30. № 4.
- [8] *Бондарь М.П., Первухина О.Л.* // ФГВ. 2000. Т. 36. № 2. С. 110–121.
- [9] *Бондарь М.П.* // Физическая мезомеханика 2003. 3. С. 75–87.
- [10] *Grebe H.A., Pak H.-R., Meyer M.A.* // Metallurgical Transaction. 1985. Vol. 16 A. P. 761.
- [11] *Забабихин Е.И.* Кумуляция и неустойчивость. Снежинск: РФЯЦ–ВНИИТФ, 1998. С. 112.
- [12] *Лифшиц Е.М., Судаков В.В., Халатников И.М.* // ЖЭТФ. 1961. 40. 1847. С. 313.
- [13] *Васильев А.А., Митрофанов В.В., Топчий М.Е.* // ФГВ. 1987. Т. 23. № 5. С. 109–131.
- [14] *Хомская И.В., Хейфец А.Э., Зельдович В.И., Литвинов Б.В., Пурыгин Н.П.* // ФММ. 2008. Т. 106. № 3. С. 312–321.