

05

Неустойчивость пластического течения: полосы Чернова–Людерса и эффект Портевена–Ле Шателье

© В.В. Горбатенко,¹ В.И. Данилов,^{1,2} Л.Б. Зувев^{1,3}

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634055 Томск, Россия

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050 Томск, Россия

e-mail: gvv@ispms.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 23 марта 2016 г.)

Исследованы закономерности развития макроскопических неоднородностей пластического течения металлов в форме полос Чернова–Людерса и эффекта Портевена–Ле Шателье. Установлены закономерности развития неоднородности деформации в этих двух случаях, изучена кинетика движения фронтов полос Чернова–Людерса и скачкообразной деформации при реализации эффекта Портевена–Ле Шателье. Показано, что фронты Чернова–Людерса и скачкообразная деформация Портевена–Ле Шателье могут рассматриваться как макроскопические автоволновые процессы переключения и возбуждения соответственно в деформируемых средах разной природы.

DOI: 10.21883/JTF.2017.03.44241.1818

Введение

Макроскопические неоднородность и неустойчивость пластического течения проявляются на масштабах порядка размера образца L как взаимосогласованные изменения зависимости напряжения от деформации $\sigma(\varepsilon)$ и паттерна (пространственно-временной структуры) локализованной деформации. Среди различных паттернов локализации наиболее известны макроскопическая шейка [1], полосы Чернова–Людерса (ПЧЛ) [1,2], а также эффекты Портевена–Ле Шателье (ПЛШ) [3,4] и Савара–Массона [5]. Первые два эффекта являются пространственной (локализация), а третий и четвертый — временной (прерывистая текучесть) неоднородностями процесса пластического течения. Традиционные объяснения закономерностей неоднородной деформации базируются на дислокационных моделях (см., например, [6–8]). Их существенной чертой является вынужденный переход от макромасштаба эффекта $\sim L$ к микромасштабу вектора Бюргера дислокаций $b \ll L$. При таком переходе практически неизбежна потеря существенных макроскопических аспектов явления.

Согласно развиваемой в работах [9,10] точке зрения, локализация пластического течения является универсальным свойством деформации материалов любой природы и наблюдается на протяжении всего процесса. Паттерны локализации с характерным масштабом $\lambda < L$ интерпретируются как моды автоволн локализованного пластического течения, тип которых определяется стадиями деформационного упрочнения [9]. По этой причине следует рассмотреть перечисленные варианты макроскопической неустойчивости пластического течения в рамках представлений об автоволновых процессах [11,12], дополнив их представлениями о самооргани-

зации и структурировании деформируемых сред, в духе предложенных авторами [13]. По этой причине далее предпринята попытка проанализировать образование и развитие названных неустойчивостей с помощью развиваемого в монографии [9] автоволнового подхода к проблеме пластичности.

Исследованные материалы и экспериментальные процедуры

Исследования развития ПЧЛ проводились на горячекатаной стали (сталь 08пс; 0.05...0.11% C, 0.35...0.65% Mn, 0.05–0.17% Si) с почти ферритной структурой и средним размером зерна $\sim 20 \mu\text{m}$. Эффект ПЛШ изучался на дюралюминии (естественно состаренный сплав Д1; 3.8...4.8% Cu, 0.4...0.8% Mn, 0.4...0.8% Mg) с размером зерна твердого раствора на основе Al $\sim 30 \mu\text{m}$ и упрочняющими выделениями субмикронного размера. Состав сплавов указан в mass.%.

Изготовленные из листов образцы типа „dog bone“ с размерами рабочей части $50 \times 10 \times 3 \text{ mm}$ растягивались со скоростью $V_{\text{mach}} = 3.3 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ (скорость деформации $\dot{\varepsilon} = 6.6 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) на испытательной машине Walter + Bai AG серии LFM-125 при 300 К. Типичные примеры диаграмм деформации $\sigma(\varepsilon)$ для стали 08пс (с зубом и площадкой текучести) и сплава Д1 (с прерывистой текучестью) показаны на рис. 1.

Предназначенная для наблюдений плоская поверхность образцов была диффузно отражающей, что определялось требованиями используемой экспериментальной техники. В настоящей работе визуализация зон локализации пластической деформации и регистрация их кинетики осуществлялись методом цифровой статистической

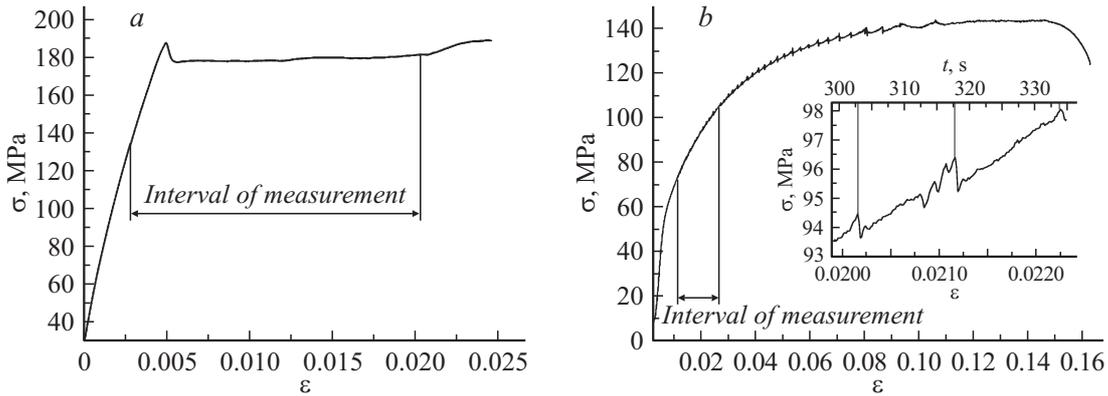


Рис. 1. Деформационные кривые: сталь (а), сплав D1 (б). На врезке — форма зубца.

спекл-фотографии [14], разработанным на базе спекл-фотографии [15]. Для его реализации растягиваемый образец освещался когерентным светом полупроводникового лазера с длиной волны 635 nm и мощностью 15 mW. Полученные при таком освещении изображения деформируемого образца с наложенными на них спекл-картинами регистрировались цифровой видеокамерой PixeLink PL-B781 с частотой 10 Hz, оцифровывались и записывались. Для каждой точки изображения формировалась последовательность отсчетов, характеризующая временной ход ее яркости, вычислялись дисперсия и математическое ожидание, соотношения которых использовались для отображения зон локализации деформации. Используя такую методику, удастся практически *in situ* регистрировать области, в которых при заданном приросте общего удлинения образца локализуется деформация материала. На приведенных далее в настоящей работе фотографиях образцов такие области локализации деформации имеют вид узких темных линий.

Развитие полос Чернова–Людерса

Диаграммы деформации $\sigma(\epsilon)$ стальных образцов демонстрируют (рис. 1, а) предел пропорциональности σ_{pl} , верхний $\sigma_y^{(u)}$ и нижний $\sigma_y^{(l)}$ пределы текучести, а также площадку текучести протяженностью ~ 0.03 , на которой заметны колебания деформирующего напряжения. Для полного охвата процессов зарождения и развития ПЧЛ в стали в ходе экспериментов регистрация спекл-изображений начиналась при напряжении $\sigma \approx \sigma_{pl} < \sigma_y^{(u)}$, как показано на рис. 1, а, и прекращалась при завершении площадки текучести и переходе к стадии деформационного упрочнения.

Как показал эксперимент, пластическая деформация локализуется сначала в форме зародыша ПЧЛ, который появляется при $\sigma \approx \sigma_{pl}$, т.е. на стадии микропластической деформации. Как было показано ранее [16], его появление сопровождается акустоэмиссией. На рис. 2 видно, как зародыш в виде узкого клина деформированного материала прорастает поперек образца со скоростью $V_{nuc} \approx (0.4 \dots 1.2) \cdot 10^{-3}$ m/s. На диаграмме $\sigma(\epsilon)$

росту зародыша соответствует формирование восходящей и нисходящей ветвей зуба текучести по пути $\sigma_{pl} \rightarrow \sigma_y^{(u)} \rightarrow \sigma_y^{(l)}$.

В момент, когда зародыш пересекает все сечение образца, заканчивается формирование ПЧЛ и начинается ее расширение. На диаграмме $\sigma(\epsilon)$ этому процессу соответствует площадка текучести на уровне $\sigma = \sigma_y^{(l)}$. Сформированная ПЧЛ ограничена парой фронтов, движущихся в противоположных направлениях вдоль оси образца со скоростями $\pm V_f$. Наблюдаемые иногда одиночные фронты обычно связаны с зарождением ПЧЛ у захвата испытательной машины, когда один из фронтов невидим, потому что почти сразу уходит с наблюдаемой части образца.

Важной характеристикой процесса является скорость движения фронтов ПЧЛ. Выяснилось, что при зарождении одной ПЧЛ ее два фронта движутся в противоположные стороны с практически одинаковыми скоростями $V_f \approx \pm 8 \cdot 10^{-5}$ m/s, так что $25V_{mach} \approx |V_f| \approx 0.1V_{nuc}$. По мере приближения одного из фронтов к захвату машины его скорость падает до нуля, а скорость второго увеличивается до $(1.3 \dots 1.5) \cdot 10^{-4}$ m/s. При зарождении одновременно двух полос (рис. 3) вначале все четыре фронта движутся с почти одинаковыми, но меньшими скоростями $\pm (3 \dots 5) \cdot 10^{-5}$ m/s. Когда фронты 1 и 4, приближаясь к захватам, замедляются и останавливаются, оставшиеся фронты 2 и 3 перемещаются навстречу друг другу с удвоенной по сравнению с первоначальной скоростью. Углы наклона фронтов к оси растяжения образца составляют около $\sim \pi/3$, но по мере приближения к захватам фронты обычно поворачиваются до $\sim \pi/2$ к оси образца.

Таким образом, для фронтов ПЧЛ в деформируемом образце при заданном значении V_{mach} на площадке текучести выполняется правило

$$\sum_{i=1}^N |V_f^{(i)}| = \tilde{V}_f = \text{const}, \quad (1)$$

в котором $|V_f^{(i)}|$ — модуль скорости движения i -того фронта ПЧЛ, N — число одновременно движущихся

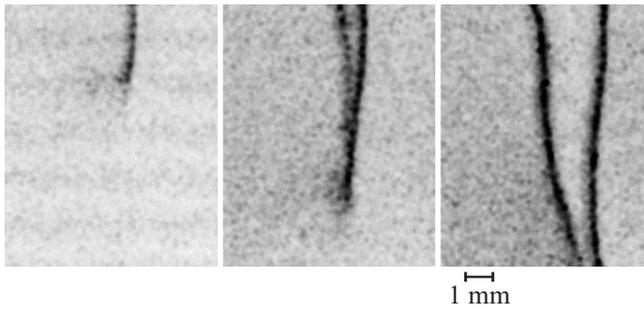


Рис. 2. Зарождение и рост зародыша ПЧЛ. Интервал между отдельными изображениями 7 с.

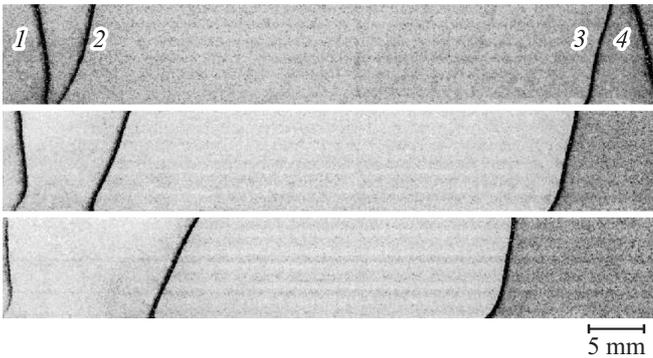


Рис. 3. Распространение двух ПЧЛ. Интервал между отдельными изображениями 60 с.

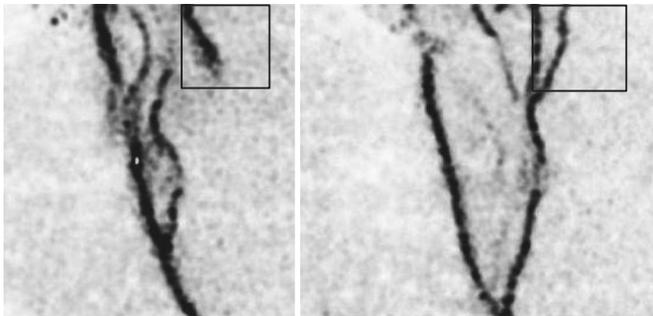


Рис. 4. Развитие и расщепление фронта ПЧЛ. Выделена область зарождения нового фронта.

фронтов, а $\tilde{V}_f = 1.6 \cdot 10^{-4}$ м/с. Правило (1) обеспечивает постоянство скорости роста площади пластически деформированной зоны в образце на площадке текучести.

Связь скоростей V_{mach} и \tilde{V}_f находится из равенства двух оценок времени деформации, записанного в виде $L/\tilde{V}_f \approx \delta L/V_{\text{mach}}$, где δL — абсолютное удлинение образца на площадке текучести. В таком случае

$$\tilde{V}_f = \frac{L}{\delta L} V_{\text{mach}} = \frac{V_{\text{mach}}}{\varepsilon_{pl}} > V_{\text{mach}}, \quad (2)$$

причем $\varepsilon_{pl} = \delta L/L$ — длина площадки текучести в единицах деформации. Обычно $10^{-2} \leq \varepsilon_{pl} \leq 10^{-1}$, так что $10V_{\text{mach}} \leq \tilde{V}_f \leq 10^2 V_{\text{mach}}$, т. е. $10 \leq \frac{\tilde{V}_f}{V_{\text{mach}}} \leq 10^2$ [17,18].

Методика цифровой статистической спекл-фотографии позволила получить данные о деталях структуры фронтов ПЧЛ и их движении. Как показано на рис. 4, разные участки фронтов движутся с неодинаковыми скоростями, так что линия фронта может локально искривляться и расщепляться. Перед каждым из фронтов в недеформированной части образца возможно зарождение предвестников, конфигурация которых напоминает зародыш ПЧЛ. Предвестники, расширяясь, формируют новый фронт на расстоянии 1.5...2 мм от исходного, после чего оба фронта согласованно перемещаются в одном направлении, причем задний фронт в этом случае проходит по уже пластически деформированной части образца.

Встреча движущихся фронтов при развитии в образце двух ПЧЛ может осуществляться по двум сценариям. При реализации первого наблюдается проникновение фронтов в области смежных полос, т. е. пластическая деформация, происходившая до этого в одной полосе, еще некоторое время продолжается в деформированной области, относящейся к другой. Во втором сценарии зона между фронтами фрагментируется с образованием вторичных фронтов, соединяющих первичные. Этот процесс сопровождается колебаниями напряжения относительно уровня площадки текучести $\sigma_y^{(l)}$, о которых упоминалось выше. При этом первичные фронты продолжают движение по ранее продеформированной части образца.

Развитие прерывистой текучести

Пластическая деформация сплава Д1 характеризуется эффектом ПЛШ [3,4,19]. Начиная от предела текучести на всем протяжении кривой $\sigma(\varepsilon)$, показанной на рис. 1, *b*, наблюдаются деформационные зубцы прерывистой текучести, форма которых непрерывно эволюционирует по мере снижения скорости деформирования из-за удлинения образца. При эффекте ПЛШ на кривой $\sigma(\varepsilon)$ последовательно наблюдаются зубцы типов А, В и С [20]. На стадии линейного деформационного упрочнения в интервале деформаций $0.01 \leq \varepsilon \leq 0.03$ в сплаве Д1 формируются преимущественно зубцы С-типа [21], которые на кривой $\sigma(\varepsilon)$ выглядят как одиночные крупные срывы напряжения (вставка к рис. 1, *b*) и связаны с образованием морфологически наиболее простых одиночных полос локализованной деформации. По этой причине регистрацию и анализ спекл-изображений при деформации сплава Д1 в настоящей работе производили именно на этой стадии, как показано на рис. 1, *b*.

Как и в случае ПЧЛ, полосы ПЛШ зарождаются на боковой поверхности образца у захватов или в средней части рабочей зоны, а затем прорастают через все сечение образца. Однако зародыши в этом случае растут со скоростью ~ 1 м/с, что на 3 порядка выше скорости прорастания зародышей ПЧЛ. Сформировавшаяся после прорастания зародыша полоса содержит передний и

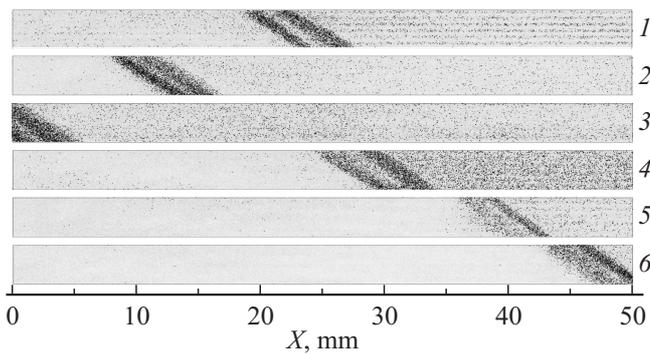


Рис. 5. Последовательные изображения движущейся полосы локализованной деформации при эффекте ПЛШ. Время между последовательными изображениями 5 s.

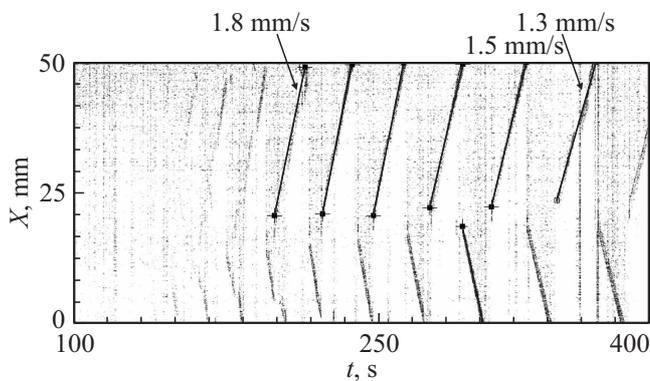


Рис. 6. Хронограмма движения полос локализованной деформации при прерывистой текучести образца алюминиевого сплава Д1.

задний фронты на расстоянии $\sim 1.7 \dots 2 \text{ mm}$ друг от друга (рис. 5) и наклонена к оси растяжения образца на угол $\pi/3$. Полоса автоматически [22] движется вдоль образца к одному из захватов испытательной машины со скоростью $\pm V_{sb}$. На диаграмме $\sigma(\epsilon)$ при зарождении и движении полосы отмечается зубец прерывистой текучести С-типа с последующим возрастанием деформирующего напряжения.

Когда полоса достигает захвата, деформирующее напряжение снова сбрасывается, и в средней части образца формируется новая полоса, которая движется по образцу в противоположном по отношению к предыдущей направлении. После того как и она достигает захвата, описанный процесс повторяется, так что каждому зубцу прерывистой текучести соответствует пробег одной полосы ПЛШ по половине рабочей части образца. Таким образом, в случае прерывистой текучести полосы локализованной деформации ПЛШ пробегают по рабочей части образца многократно, как это демонстрирует приведенная на рис. 6 хронограмма процесса. С ее помощью можно оценить модуль скорости движения полос $1.3 \cdot 10^{-3} \leq |V_{sb}| \leq 1.8 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, более чем на порядок превышающий скорость движения

фронтов ПЧЛ. Периодическое движение фронтов ПЛШ продолжается при деформационном упрочнении вплоть до начала формирования шейки разрушения.

Сравнение локализованной деформации на фронтах ПЧЛ и при эффекте ПЛШ

Основные результаты наблюдений кинетики развития фронтов ПЧЛ и ПЛШ, полученные в настоящей работе, указывают как на сходство, так и на различие этих явлений. Говоря о сходстве, следует прежде всего отметить, что фронты ПЧЛ и полосы при эффекте ПЛШ суть макроскопические проявления локализации пластической деформации, представляющие собой узкие движущиеся зоны, в которых сосредоточено пластическое течение. Сходна кинетика их возникновения: в обоих случаях зародыши локализованной пластичности зарождаются на боковой поверхности рабочей части образцов, после чего прорастают через все сечение.

Существенные различия характеров обсуждаемых процессов прослеживаются на стадии развитой локализованной деформации, связанной с ПЧЛ и эффектом ПЛШ. Так, эволюция ПЧЛ после зарождения есть ее расширение в пределах рабочей части образца. Вся пластическая деформация при этом локализована в движущихся в противоположных направлениях фронтах, имеющих сложную меняющуюся в процессе движения форму. Фронты ПЧЛ движутся независимо друг от друга, но так, чтобы выполнялось правило постоянства суммы модулей их скоростей (1). Если в образце одновременно расширяются более одной ПЧЛ, их фронты могут встречаться и взаимодействовать. При развитии эффекта ПЛШ пластическая деформация в каждый момент времени существует только одна полоса, в которой полностью локализовано пластическое течение, так что при прерывистой текучести акты встречи полос невозможны. Наконец, еще одно существенное различие эффектов состоит в том, что фронты ПЧЛ могут пробежать по образцу только один раз, в то время как полосы ПЛШ многократно пробегают рабочую длину образца.

К пониманию природы этих отличий ведет автоволновая модель пластического течения [9], вводящая промежуточный, автоволновой масштаб $b < \lambda < L$. При построении этой модели делается естественное предположение о том, что деформируемая среда является активной, т.е. содержит распределенные по объему источники энергии [11,13,23]. В качестве таких источников при анализе пластичности имеет смысл рассматривать концентраторы упругих напряжений [10], способные релаксировать с рождением дефектов кристаллической структуры. Свойства активной среды, соответствующей конкретным материалам, в частности, использованным в настоящей работе, определяются строением концентраторов и кинетикой их релаксации и могут меняться в процессе деформирования. Попытаемся связать разли-

чие эффектов ПЧЛ и ПЛШ с возможностью существования двух типов активных сред, способных генерировать разные моды автоволн локализованной пластичности.

В случае ПЧЛ в соответствии с известными микроскопическими моделями [1,2] будем считать, что на движущемся фронте элементы активной среды переходят из упругого в пластически деформированное состояние за счет релаксации концентраторов напряжений. В рамках общей теории автоволновых процессов [11] такая среда называется бистабильной, а фронт возмущения в ней представляет собой автоволну переключения в системе, состоящей из бистабильных элементов [11,23]. Последние могут существовать в метастабильном (упругом) или стабильном (пластически деформированном) состояниях. Необратимость актов переключения состояний, т.е. переходов из метастабильного в стабильное состояние, исключает повторное прохождение фронтов ПЧЛ по одной и той же области образца. Иначе говоря, в бистабильной активной среде энергия, расходуемая на генерацию автоволн, не восстанавливается [23]. По этой причине общим правилом для автоволн переключения является аннигиляция их фронтов при встрече [11,23], которая в случае деформации на площадке текучести наблюдается достаточно часто.

В случае эффекта ПЛШ на основании данных о микромеханизмах явления [3,8,19] можно считать, что при движении полосы локализованной пластичности реализуется другая последовательность изменения состояния элементов активной среды. Принципиальным в этом случае представляется различие в поведении материала на переднем и заднем фронтах полосы локализованной деформации. Можно считать, что передний фронт полосы связан с переключением элементов, аналогичным описанному выше. Однако чтобы объяснить, почему в отличие от ПЧЛ при эффекте ПЛШ в образце периодически рождается новая деформационная полоса, следует предположить, что на заднем фронте бегущей полосы релаксированные элементы не возвращаются в исходное, а переходят в третье состояние, в котором они на определенное время теряют способность изменяться. Из-за необратимости пластического течения такой переход не может быть обратным превращением, ведущим к полному возврату среды в исходное состояние после прохождению полосы.

Активные среды такого типа хорошо известны в теории автоволновых процессов и называются возбуждаемыми [23]. Они обладают возможностью восстановления энергии, затраченной на образование автоволны, и состоят из возбуждаемых элементов, которые способны существовать в состояниях покоя, возбуждения или рефрактерности. В средах такого сорта возможно рождение и распространение одиночных импульсов с крутыми передним и задним фронтами, медленно падающим плато между ними и медленной релаксацией в исходное состояние [23]. По существу, такой импульс равносителен паре сопряженных фронтов переключения. На переднем фронте импульса реализуется переход возбуждаемых

элементов из метастабильного состояния в состояние возбуждения. На заднем фронте импульса элементы стремятся к восстановлению исходной ситуации, что, однако, невозможно полностью из-за изменения состояния среды. Процесс завершается стадией рефрактерности, которая характеризуется периодом τ_{ref} , в течение которого элементы среды невосприимчивы к внешнему воздействию. Новое качество активной среды в этом случае возникает потому, что возбуждение элементов среды, невозможное при $r < \tau_{\text{ref}}$, снова становится возможным при $t > \tau_{\text{ref}}$. Возникающее в такой среде возмущение, называемое автоволной возбуждения, представляет собой импульс, многократно пробегающий в системе [23]. Это, очевидно, справедливо в отношении полосы локализованной деформации ПЛШ, которая служит примером деформационной автоволны возбуждения, многократно проходящей по образцу.

Развивая изложенную точку зрения и основываясь на общих представлениях [24], рассмотрим некоторые соображения о микроскопической природе бистабильных и возбуждаемых элементов применительно к деформации по механизмам ПЧЛ и эффекта ПЛШ. В случае ПЧЛ метастабильными элементами на ее фронте являются упруго напряженные кристаллиты, а стабильными — зерна, в которых уже началась пластическая деформация [1,2]. Переход элементов из метастабильного в стабильное состояние в этом случае необратим, поскольку зуб текучести, исчезающий после предварительной деформации, восстанавливается только после отжига [1,24].

В деформируемом сплаве Д1 при деформации возникает активная среда, состоящая из возбуждаемых элементов. В таком качестве можно рассматривать локальные области, связанные с термически активированным преодолением движущимися дислокациями дисперсных выделений [24]. Восстановление распределенных источников энергии (концентраторов) в такой среде может быть связано с ростом деформирующего напряжения при деформационном упрочнении. Формально оценивая τ_{ref} , придадим ему смысл интервала между последовательными актами зарождения полос локализованной пластичности, который составляет $L/2V \approx 15$ с.

Полагая, что восстановление исходной конфигурации препятствий дислокационному скольжению есть термически активированный процесс, запишем для времени рефрактерности

$$\tau_{\text{ref}} \approx \omega_D^{-1} \exp \frac{U}{k_B T}, \quad (3)$$

где $U \approx 0.8$ eV — высота потенциального барьера, соответствующая энергии взаимодействия дислокаций с локальными выделениями в сплаве Al–Cu [24], ω_D — частота Дебая, k_B — постоянная Больцмана, T — температура. Расчет для $k_B T \approx 1/40$ eV дает $\tau_{\text{ref}} \approx 15$ с, что совпадает с приведенной выше оценкой этой величины.

Таким образом, ПЧЛ и деформация при эффекте ПЛШ в значительной степени сходны друг с другом, по крайней мере, на стадии зарождения. Подобны по

своей конфигурации зуб текучести в случае ПЧЛ и зубцы эффекта ПЛШ. Однако при дальнейшей деформации в деформационном поведении сплавов возникает существенное различие, вызванное тем, что при эффекте ПЛШ сплав упрочняется и направления распространения полос становятся неравноправными, а распространению ПЧЛ отвечает площадка текучести, на которой деформационного упрочнения нет и направления движения фронтов равноправны.

Выводы

1. Показано, что ПЧЛ и деформационные полосы при эффекте ПЛШ зарождаются в деформируемых средах по одному механизму путем прорастания зародыша, возникающего на боковой поверхности образца, через все сечение.

2. Установлено, что скорости движения фронтов ПЧЛ и деформационных полос при эффекте ПЛШ отличаются на порядок.

3. Фронты ПЧЛ и деформационные полосы при эффекте ПЛШ представляют собой автоволны переключения и возбуждения соответственно возникающие в активных деформируемых средах разной природы.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук России на 2013–2020 гг. и частично поддержана грантом РФФИ № 14-08-00299. При выполнении экспериментальных исследований использовалось научное оборудование Центра коллективного пользования „Нанотех“ при ИФПМ СО РАН.

Список литературы

- [1] *Pelleg J.* Mechanical Properties of Materials. Dordrecht: Springer, 2013. 633 p.
- [2] *Hä hner P.* // Appl. Phys. A. 1994. Vol. 58. N 1. P. 41–58.
- [3] *Rizzi E., Hähner P.* // Int. J. Plasticity. 2004. Vol. 20. N 1. P. 121–165.
- [4] *Zaiser M., Aifantis E.C.* // Int. J. Plasticity. 2006. Vol. 22. N 9. P. 1432–1455.
- [5] *Белл Дж.Ф.* Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Т. 1. М.: Наука, 1984. 596 с.
- [6] *Малыгин Г.А.* // ФТТ. 2011. Т. 53. Вып. 2. С. 341–345.
- [7] *Sun H.B., Yoshida F., Ma X.* // Mat. Lett. 2003. Vol. 57. N 23. P. 4535–4539.
- [8] *Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2012. Т. 76. Вып. 1. С. 97–107.
- [9] *Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А.* Физика макролокализации пластического течения. Новосибирск: Наука, 2008. 328 с.
- [10] *Зуев Л.Б.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. Вып. 10. С. 1206–1213.
- [11] *Васильев В.А., Романовский Ю.М., Яхно В.Г.* Автоволновые процессы. М.: Наука, 1987. 240 с.
- [12] *Davydov V.A., Davydov N.V., Morozov V.G., Stolyarov M.N., Yamaguchi T.* // Cond. Matter Phys. 2004. Vol. 7. N 3(39). P. 565–578.
- [13] *Seeger A., Frank W.* Non-Linear Phenomena in Material Science. N.Y.: Trans. Tech. Publ., 1987. P. 125–138.
- [14] *Zuev L.B., Gorbatenko V.V., Pavlichev K.V.* // Measur. Sci. Technol. 2010. Vol. 21. N 5. P. 054014-18.
- [15] *Джоунс Р., Уайкс К.* Голографическая и спекл-интерферометрия. М.: Мир, 1986. 327 с.
- [16] *Муравьев Т.В., Зуев Л.Б.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 8. С. 135–139.
- [17] *Плехов О.А., Наймарк О.Б., Saintier N., Palin-Luc T.* // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 8. С. 56–61.
- [18] *Петров Ю.В., Бородин И.Н.* // ФТТ. 2015. Т. 57. Вып. 2. С. 336–341.
- [19] *Криштал М.М.* // ФММ. 2001. Т. 92. Вып. 3. С. 89–112.
- [20] *Cuddy L.J., Leslie W.C.* // Acta Met. 1972. Vol. 20. N 8. P. 1157–1167.
- [21] *Данилов В.И., Бочкарева А.В., Зуев Л.Б.* // ФММ. 2009. Т. 107. Вып. 6. С. 660–667.
- [22] *Баренблатт Г.И.* Автономные явления — анализ размерностей и скейлинг. Долгопрудный: Издат. дом „Интеллект“, 2009. 215 с.
- [23] *Кринский В.И., Жаботинской А.М.* // Автоволновые процессы в системах с диффузией. Горький: ИПФ АН СССР, 1981. С. 6–31.
- [24] *Штремель М.А.* Прочность сплавов. Ч. 2. Деформация. М.: Металлургия, 1997. 527 с.